

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Інститут енергозбереження та енергоменеджменту

Кафедра електропостачання

«На правах рукопису»
УДК 621.31

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ В.А. Попов

« ____ » _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
спеціалізації Системи електропостачання

на тему: «Мультиагентні системи керування споживачами електроенергії в локальних електроенергетичних системах»

Виконав (-ла): студент (-ка) VI курсу, групи ОЕ-71мн

Таргонський Владислав Анатолійович _____

Науковий керівник д.т.н., проф. Денисюк С.П. _____

Консультант нормоконтроль ас. Прокопенко І.Д. _____

Рецензент _____

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2019 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Інститут енергозбереження та енергоменеджменту
Кафедра електропостачання

Інститут/факультет Інститут енергозбереження та енергоменеджменту
(повна назва)
Кафедра електропостачання

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Спеціалізація «Системи електропостачання»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ В.А. Попов

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту
Таргонському Владиславу Анатолійовичу

1. Тема дисертації: «Мультиагентні системи керування споживачами електроенергії в локальних електроенергетичних системах»
науковий керівник дисертації: д.т.н., проф. Денисюк Сергій Петрович
затверджені наказом по університету від 19 березня 2019 р. №926-с
2. Строк подання студентом дисертації: 17 травня 2019 року
3. Об'єкт дослідження: процеси керування та взаємодії активних споживачів електроенергії з локальними електроенергетичними системами в умовах лібералізованого ринку електроенергії України..
4. Вихідні дані: методи побудови мультиагентних систем керування споживачами електроенергії в локальних електроенергетичних системах за умови використання джерел розосередженої генерації та зособів акумулювання електроенергії.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: проаналізувати стан розвитку локальних електроенергетичних систем України; дослідити методи та принципи побудови мультиагентних систем керування споживачами

електроенергії, розробити алгоритми децентралізованого мультиагентного керування локальними електроенергетичними системами.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: презентація – наочні матеріали за результатами дослідження, алгоритми розрахунків та таблиці з отриманими результатами.

7. Орієнтовний перелік публікацій:

1. «Мультиагентні системи керування споживачами електроенергії в локальних інтелектуальних електромережах».
2. «Оцінка результатів моніторингу енергоефективності регіонів України».
3. «Evaluation of Exchange Processes in Local Systems with Flexible Generation».
4. «Локальні електроенергетичні системи з активним споживачем: методи побудови та алгоритми їх функціонування».

8. Консультанти розділів дисертації

Нормоконтроль ас. Прокопенко І.Д.

9. Дата видачі завдання 11 березня 2019 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Визначення мети, об'єкту, предмету дослідження.		
2.	Визначення попередньої структури дисертації		
3.	Огляд літератури та робота над першим розділом		
4.	Дослідження принципів побудови мультиагентних систем керування		
5.	Розробка алгоритмів керування активним споживачем		
6.	Проведення розрахунків та робота над третім розділом		
7.	Оформлення дисертації		
8.	Оформлення реферату та презентації, проходження перевірки на плагіат та рецензування		
9.	Передзахист МД		
10.	Захист дисертації		

Студент

Таргонський В.А.

Науковий керівник дисертації

Денисюк С.П.

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація виконана на тему “Мультиагентні системи керування споживачами електроенергії в локальних електроенергетичних системах”. Містить 128 сторінок, 33 рисунка, 9 таблиць та 102 бібліографічних найменувань за переліком посилань.

Актуальність теми. В зв’язку з процесом реферування енергетики України згідно положень концепції Smart Grid ключовими питаннями, підлягають вирішенню, є інтеграція джерел розосередженої генерації, розробка алгоритмів та систем керування електроенергетичними системами та посилення інформаційної складової у процесах керування системами електропостачання. Тому наукова дисертація “Мультиагентні системи керування споживачами електроенергії в локальних електроенергетичних системах”, що вирішує задачі керування споживачами електроенергії в локальних електроенергетичних системах є актуальною.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. На сьогоднішній день на кафедрі електропостачання широко розглядаються та вирішуються питання впровадження розосереджених джерел електроенергії в електропостачальні системи та розробки систем керування ними. Дана магістерська дисертація відповідає НДР №2013-п «Розроблення науково-методологічних основ агрегування віртуальними електростанціями і активними споживачами в умовах енергоринку»

Мета і задачі дослідження. Дослідження роботи локальних електроенергетичних систем та розробка алгоритмів та системи мультиагентного керування взаємодії активних споживачів з елементами локальної електроенергетичної системи.

Об’єктом дослідження. Процеси керування та взаємодії активних споживачів електроенергії з локальними електроенергетичними системами в умовах лібералізованого ринку електроенергії України.

Предмет дослідження. Методи та засоби побудови систем мультиагентного керування електроенергетичними об'єктами в локальних електроенергетичних системах за наявності активних споживачів електроенергії, джерел розосередженої генерації та засобів акумуляції електроенергії.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у розробці власної системи керування активними споживачем за допомогою використання мультиагентних систем керування та алгоритмів оптимізації процесів генерації електроенергії, зарядження та розрядження засобів акумуляції електроенергії активних споживачів електроенергії.

Практичне значення результатів полягає у розробці алгоритмів та системи мультиагентного керування локальними електроенергетичними системами, що приводить до модернізації електросистеми України, підвищення надійності та енергоефективності електромереж за рахунок використання мультиагентних систем керування споживачами електроенергії в локальних електроенергетичних системах та впровадженні механізмів децентралізованого керування активними споживачами, що передбачає оптимізацію режиму роботи джерел розосередженої генерації та засобів накопичення електроенергії, підвищення енергоефективності електросистеми та показників якості електропостачання. зменшення втрат електроенергії, підвищення надійності електромережі та максимізацію вигоди від активної взаємодії для всіх об'єктів взаємодії.

Апробація результатів дисертації та публікації. Результати досліджень були оприлюднені на чотирьох науково-технічних конференціях та включені в збірники праць:

1. Мультиагентні системи керування споживачами електроенергії в локальних інтелектуальних електромережах. Перша науково-технічна конференція магістрантів ІЕЕ – 21 листопада 2018 року.

2. Оцінка результатів моніторингу енергоефективності регіонів України. Міжнародна науково-технічна та навчально-методична конференція

«Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку» PEMS-2018 – 17-19 квітня 2018 року.

3. Evaluation of Exchange Processes in Local Systems with Flexible Generation. 2019 IEEE 6th International conference on Energy Smart Systems (2019 IEEE ESS) – 17-19 квітня 2019 року.

4. Локальні електроенергетичні системи з активним споживачем: методи побудови та алгоритми їх функціонування. Науково-технічна конференція ЕНЕРГЕТИКА. ЕКОЛОГІЯ. ЛЮДИНА. – конференція молодих дослідників-студентів та аспірантів – 24-25 квітня 2019 року.

Ключові слова: *локальна електроенергетична система, активний споживач, відновлювані джерела енергії, мультиагентна система керування, засоби акумуляції електроенергії.*

ABSTRACT

The master's dissertation is performed on the topic "Multi-agent systems for controlling electric power consumers in local electric power systems". Contains 128 pages, 33 figures, 9 tables and 102 bibliographic references.

Actuality of theme. In connection with the energy utilization process in Ukraine in accordance with the provisions of the Smart Grid concept, the key issues to be solved are the integration of distributed generation sources, the development of algorithms and control systems for power systems and the strengthening of the information component in the processes of managing power supply systems. Therefore, the scientific thesis "Multiagent systems for controlling electric power consumers in local electric power systems", which solves the problems of controlling electricity consumers in local electric power systems, is relevant.

Relationship of work with scientific programs, plans, themes. Today, the Department of Electricity has widely considered and solved the issues of the introduction of dispersed electricity sources into power supply systems and the development of their control systems. This master's thesis corresponds to GDR №2013-n "Development of scientific and methodological bases of aggregation of virtual power plants and active consumers in the conditions of the energy market"

Purpose and tasks of the research. Research of work of local electric power systems and development of algorithms and systems of multi-agent control of interaction of active consumers with elements of local electric power system.

The object of research. Processes of control and interaction of active consumers of electricity with local electric power systems in conditions of liberalized electricity market of Ukraine.

Subject of research. Methods and means of constructing multi-agent control systems of electric power objects in local electric power systems in the presence of active consumers of electricity, sources of distributed generation and means of accumulation of electricity.

The scientific novelty of the obtained results is to develop its own active consumer control system by using multi-agent control systems and algorithms for optimizing the generation of electricity, charging and discharging of the means of accumulation of electric power of active consumers of electric power.

The practical significance of the results is the development of algorithms and multi-agent control system of local electric power systems, which leads to the modernization of the Ukrainian electricity system, increasing the reliability and energy efficiency of the electricity grids by using multi-agent systems for controlling electricity consumers in local electric power systems and introducing decentralized control mechanisms for active consumers, which involves optimization operating mode sources of dispersed generation t means electricity savings, energy efficiency and quality electric power supply. reduction of electric power losses, increase of reliability of the power grid and maximization of benefits from active interaction for all objects of interaction.

Key words: *local electric power system, active consumer, renewable energy sources, multiagent control system, means of accumulation of electric power.*

ЗМІСТ

ВСТУП.....	12
1 АНАЛІЗ ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ	17
1.1 Загальна характеристика локальних електроенергетичних систем.....	17
1.2 Стан альтернативної енергетики та гнучкої генерації в Україні	25
1.3 Керування попитом на енергоресурси	30
1.3.1 Модель оптимізації на ринку реагування на попит	30
1.3.2 Стратегія балансування потужності оператора розподільної системи.....	31
1.4 Взаємодія з активним споживачем.....	33
1.5 Моделі та ринкові процеси в енергетиці.....	38
1.5.1 Модель локального енергетичного ринку	38
1.5.2 Модель справедливого аукціону на локальних енергетичних ринках	40
1.6 Компенсація реактивної потужності для підвищення енергоефективності та надійності електричних мереж	43
Висновки:.....	44
2 МУЛЬТИАГЕНТНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТА ФОРМАЛІЗАЦІЯ АКТИВНОГО СПОЖИВАЧА.....	46
2.1 Мультиагентні системи керування в локальних електроенергетичних системах.....	46
2.1.1. Загальна характеристика мультиагентних систем	46
2.1.2 Формалізація ЛЕС у вигляді мультиагентної системи	51
2.1.3 Синтез моделі МАС локальної електроенергетичної системи..	54
2.2 Об'єднання активних споживачів	56
2.2.1 Засоби виробництва електроенергії.....	57
2.2.2 Системи акумуляції електроенергії	63
2.2.3 Керування попитом на енергоресурси.....	65
Висновки:.....	65

3	МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ КЕРУВАННЯ ЛОКАЛЬНИМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИМИ СИСТЕМАМИ З АКТИВНИМ СПОЖИВАЧЕМ.....	66
3.1	Методи керування активним споживачем	66
3.1.1	Формалізація спільноти-споживача.....	66
3.1.2	Децентралізована схема керування	68
3.1.3	Алгоритм «Контрольованого навчання».....	69
3.2	Аналіз потоку потужності змінного струму	76
3.2.1	Оптимізація потоку потужності в ЛЕС	78
3.2.2	Алгоритм ПЗР-ОПП	79
3.2.3	Задача оптимізації потоку потужності	84
	Висновки:.....	86
4	ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ	88
4.1	Тестова локальна електроенергетична система	88
4.2	Тестові сценарії моделювання	89
4.2.1	Профілі навантаження активних споживачів.....	89
4.2.2	Профілі сонячного випромінювання	90
4.2.3	Ціни на електроенергію.....	91
4.3	Алгоритм «Правила великого пальця»	92
4.4	Результати моделювання системи керування АС.....	95
4.5	Обмінна потужність в ЛЕС.....	101
	Висновки:.....	106
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	108
	ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:	111
	ДОДАТКИ	122

ПРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ЛЕС – локальна електроенергетична система

ВДЕ – відновлювані джерела енергії

ДРГ – джерело розосередженої генерації

СЕС – сонячна електростанція

ВЕС – вітрова електростанція

АС – активний споживач

ОАС – об'єднання активних споживачів

МАС – мультиагентна система

МАСК – мультиагентна система керування

ГАЕС – гідро-акумулююча електростанція

КН – контрольоване навчання

ПВП – правило великого пальця

ОПП – оптимальний потік потужності

ПЗР – пряма та зворотня розгортка

ЕНС – енергетично-незмінний стан

ПЯЕ – показники якості електроенергії

ВСТУП

Більшість країн світу перебувають в стані енергетичного переходу з традиційної енергетики, основаної на використанні викопного палива та застарілих технологій, до інноваційної, з використанням нетрадиційних відновлюваних джерел енергії (НВДЕ) та принципів раціонального використання енергоресурсів. Розвиток НВДЕ впливає на всі аспекти енергетичної сфери країни. З боку теплозабезпечення НВДЕ поліпшують ситуацію на ринку, але з електроенергетикою цей процес має безліч аспектів.

Широке впровадження технологій відновлювальної енергетики та до клієнтоорієнтованого підходу згідно з положеннями концепції Smart Grid спричиняє появу нових гравців на ринку, що можуть як поліпшити ситуацію, так і чинити негативний вплив на електроенергетичну систему [86]. Такі гравці отримали назву активних споживачів. У межах Smart Grid кінцевий споживач розглядається в якості партнера суб'єктів електроенергетики в частині забезпечення надійної роботи електроенергетичної системи, набуває статусу «активного» і стає одним з основних елементів в енергосистемі [86]. Поширення джерел розосередженої генерації електроенергії (ДРГ), основаних на використанні НВДЕ, зменшує навантаження з боку виробництва електроенергії (для покриття попиту електрикою використовується менша кількість електростанцій, що працюють з використанням традиційних технологій виробництва електроенергії) збільшується пропускна спроможність магістральних та розподільчих електромереж, але водночас це спричиняє низку проблем. Найбільшою проблемою є непередбачуваність роботи ДРГ та відсутність нормативно-правової бази, що регулює діяльність гравців енергоринку, що використовують такі установки. В свою чергу це спричиняє погіршення ситуації в електричній системі і появу таких негативних наслідків як: погіршення якості постачання електроенергії; дисбаланс електричної системи; поява зворотних потоків електроенергії в локальних

системах електропостачання; проблеми з прогнозуванням режимів електропостачання. Вказані проблеми повинні вирішуватись на державному рівні, але поступова лібералізація ринку потребує вирішення цього питання в регіональних межах.

Сучасні тенденції розвитку електроенергетичних систем визначаються рівнем їх інтелектуалізації. При розгортанні механізмів впровадження концепції Smart Grid необхідно враховувати конкретні можливості і потреби кожної країни та регіону. На даний момент в США, Японії, Південній Кореї та в європейських країнах спостерігається підвищений інтерес до проблем скорочення витрат на генерацію електроенергії та на її використання. Задача швидкого оновлення електричних мереж із врахуванням вимог потребує забезпечення впровадження нових принципів керування енергетичними та інформаційними процесами в електромережах [87]. Тому важливо оцінити стан електричних мереж, можливості до впровадження принципів концепції Smart Grid та її потенціал у підвищенні енергоефективності та надійності мереж.

Розвиток електроенергетики України в рамках концепції Smart Grid обумовив актуальність дослідження принципів побудови інтелектуальних електричних мереж. Для сучасних електричних мереж є актуальним питання побудови інтелектуальних систем керування локальними електроенергетичними системами з врахуванням взаємодії її основних елементів.

З моменту своєї появи ЛЕС глибоко вивчені в літературі і було виявлено багато проблем та недоліків. Моніторинг та керування мережею можуть бути надзвичайно складними, що являє собою цікавий аргумент для досліджень. Динаміка електроенергетичної системи є складною навіть на менших масштабах, завдяки багатьом параметрам, що впливають на систему. Безпека мережевої роботи - не єдине, що має значення, економічна сторона проблеми також дуже актуальна. Таким чином, ця робота буде зосереджена на тому, як контролювати роботу активних споживачів усередині ЛЕС з використанням

мультіагентного підходу розробки систем керування, намагаючись забезпечити безпеку мережі, дотримуючись спільної мети.

В представленій магістерській дисертації розглянуто особливості роботи локальних електроенергетичних систем та зазначено переваги використання мультіагентних систем керування ними. Представлено характеристики однорідних і неоднорідних агентів мультіагентної системи керування та особливості їх взаємодії та формалізовано локальну інтелектуальну електроенергетичну систему у вигляді мультіагентної системи та наведено її структуру. Для локальної електроенергетичної системи формалізовано базову сукупність агентів, визначено їх функціональні обов'язки та наведено математичні описи агентів мультіагентних систем. Визначено критерії, що впливають на діяльність різних типів агентів мультіагентної системи. За результатами досліджень запропоновано формалізацію рішення задач керування і оцінки ефективності функціонування ЛЕС на основі мультіагентної системи, що дозволяє звести рішення технологічних завдань до дослідження узагальненої математичної моделі ЛЕС та дає можливість зв'язати важливі параметри реального стану системи з чисельними характеристиками критеріїв оптимальності її функціонування.

Для вирішення задачі мультіагентного керування процесами взаємодії активного споживача з локальною електроенергетичною системою було розроблено та порівняно три алгоритми децентралізованого керування активним споживачем за складовими виробництва електроенергії та процесами зарядки/розрядки засобів акумуляції електроенергії, що дозволяють підвищити надійність та оптимізувати роботу локальної електроенергетичної системи.

Метою дослідження є розробка алгоритмів та системи мультіагентного керування взаємодією активних споживачів з об'єктами локальної електроенергетичної системи, що дозволяє оптимізувати роботу та підвищити надійність локальних електроенергетичних систем.

Об'єктом дослідження. Процеси керування та взаємодії активних споживачів електроенергії з локальними електроенергетичними системами в умовах лібералізованого ринку електроенергії України.

Предмет дослідження. Методи та засоби побудови систем мультиагентного керування електроенергетичними об'єктами в локальних електроенергетичних системах за наявності активних споживачів електроенергії, джерел розосередженої генерації та засобів акумуляції електроенергії.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у розробці власної системи керування активними споживачем за допомогою використання мультиагентних систем керування та алгоритмів оптимізації процесів генерації електроенергії та динаміки роботи засобів акумулювання електроенергії, що наявні у власності активних споживачів.

Практичне значення результатів полягає у модернізації електросистеми України з метою підвищення надійності та енергоефективності електромереж за рахунок використання мультиагентних систем керування споживачами електроенергії в локальних електроенергетичних системах та впровадженні механізмів децентралізованого керування активними споживачами, що передбачає оптимізацію режиму роботи джерел розосередженої генерації та засобів накопичення електроенергії, підвищення енергоефективності електросистеми та показників якості електропостачання. зменшення втрат електроенергії, підвищення надійності електромережі та максимізацію вигоди від активної взаємодії для всіх об'єктів взаємодії.

Апробація результатів дисертації та публікації. Результати досліджень були оприлюднені на чотирьох науково-технічних конференціях та включені в збірники праць:

5. Мультиагентні системи керування споживачами електроенергії в локальних інтелектуальних електромережах. Перша науково-технічна конференція магістрантів ІЕЕ – 21 листопада 2018 року.

6. Оцінка результатів моніторингу енергоефективності регіонів України. Міжнародна науково-технічна та навчально-методична конференція «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку» PEMS-2018 – 17-19 квітня 2018 року.

7. Evaluation of Exchange Processes in Local Systems with Flexible Generation. 2019 IEEE 6th International conference on Energy Smart Systems (2019 IEEE ESS) – 17-19 квітня 2019 року.

8. Локальні електроенергетичні системи з активним споживачем: методи побудови та алгоритми їх функціонування. Науково-технічна конференція ЕНЕРГЕТИКА. ЕКОЛОГІЯ. ЛЮДИНА. – конференція молодих дослідників-студентів та аспірантів – 24-25 квітня 2019 року.

Ключові слова: *локальна електроенергетична система, активний споживач, відновлювані джерела енергії, мультиагентна система керування, засоби акумулювання електроенергії.*

1 АНАЛІЗ ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

1.1 Загальна характеристика локальних електроенергетичних систем

Під локальною електроенергетичною системою (ЛЕС) передбачається локальна розподільна мережа низької напруги, яка об'єднує, наприклад, один або кілька розосереджених енергетичних об'єктів, найчастіше використовуючи Virtual Power Plant (VPP), накопичувачі енергії, паливні елементи, когенерацію, електромобілі, систему керування попитом, яка може працювати ізольовано або підключаючись до центральної енергосистеми [58]. Спрощена схема ЛЕС представлена на рис. 1.1. Саме розосереджена енергетика та її самоорганізація в ЛЕС з використанням ефективних технологічних рішень інтелектуального керування, на думку експертів, є енергетикою майбутнього [40].

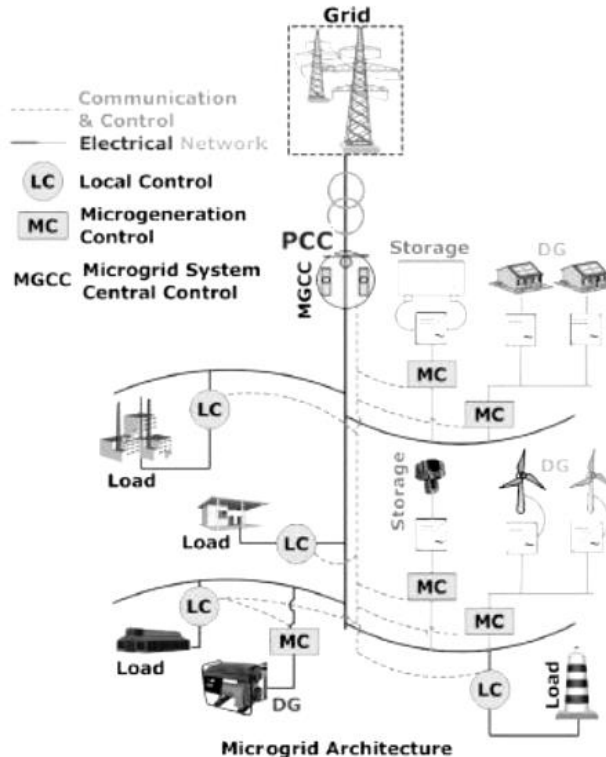


Рисунок 1.1 – Спрощена схема ЛЕС.

Енергосистеми еволюювали з недостатньо розвинених розрізаних систем в централізовану енергосистему, що працює на викопному паливі, потім в централізовану систему з використанням відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), наближаючись до останнього етапу, – до розосередженої електроенергетичної системи з використанням VPP [40].

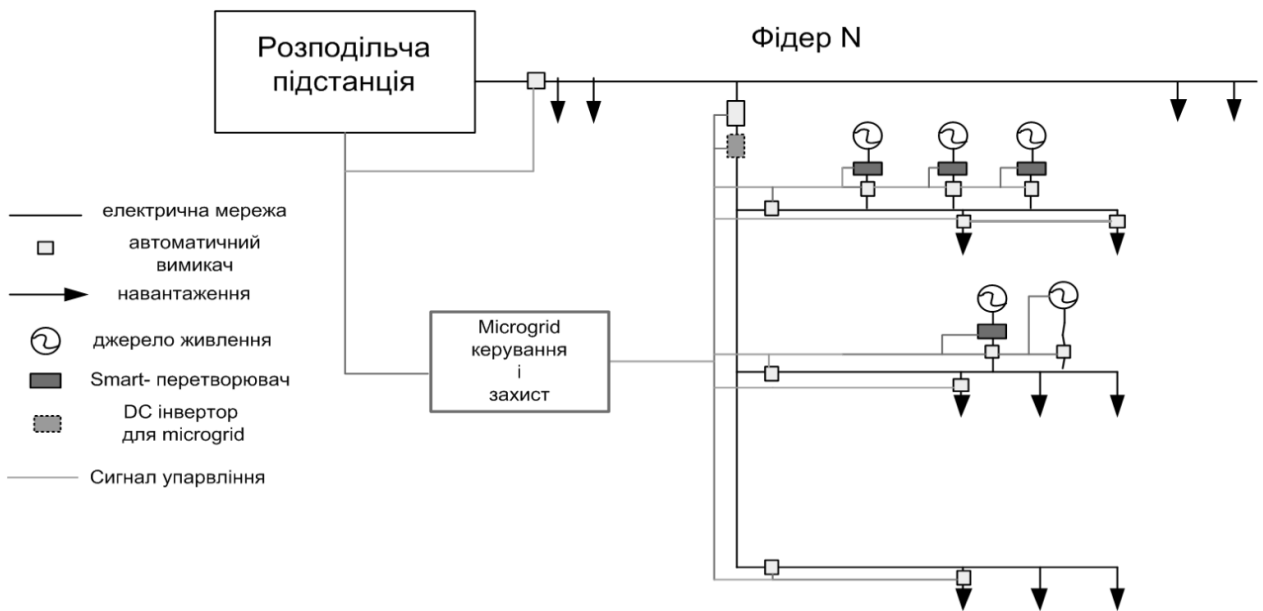


Рисунок 1.2 – Кінцева схема еволюції ЛЕС

Кінцева схема еволюції ЛЕС зображена на рис. 1.2 включає в себе переваги попередніх етапів: додаткові джерела живлення, розміщені безпосередньо біля споживачів, можливість керувати обсягами спожитої енергії від додаткових джерел, а також присутня багаторівнева архітектура керування: пристрій – ЛЕС – мережа.

Також важливим елементом ЛЕС є агрегатор, що об'єднує низку споживачів з різними характеристиками, що забезпечують відповідність вимог ринку та резервування окремих осіб як частину агрегованого об'єкта, що підвищує надійність та знижує ризик для окремих споживачів. Так як агрегатор може об'єднати ресурси одного користувача з ресурсами інших споживачів, він може надати їх потужність у відповідності до вимог ринку, які забезпечують потреби споживачів. Агрегування може досягати рівня

ефективності, достатньо для задоволення вимог, притаманним різним сегментам ринку, і може забезпечити характеристики, відповідні генерації і навіть переважати їх. Одним з ключових переваг агрегації - це розподілений характер агрегованого навантаження, що забезпечує поставку агрегатором заявленого об'єму, що не вимагає виконання своїх обов'язків.

Термін локальна електроенергетична система має аналогічне значення з терміном Мікромережі або «Microgrid». Мікромережі спочатку створювалися для забезпечення безперебійного енергопостачання об'єктів, віддалених від центральної мережі, або таких, що мають стратегічне значення. У даний час ЛЕС сприймається як перший крок на шляху до інноваційного та ефективного використання енергоресурсів на локальному рівні для отримання комерційної вигоди. У США вони отримали назву розвинених локальних енергосистем (Advanced Microgrid).

Для побудови систем керування ЛЕС необхідно враховувати загальну структуру взаємовідносин всередині об'єднаної енергосистеми. На рис. 1.3 та рис. 1.4 наведено схему взаємовідносин на лібералізованому ринку електроенергії України [91]. Лібералізація ринку електроенергії призводить до зміни механізму ціноутворення на ринку. Збільшення долі ВДЕ у енергобалансі при залишенні в дії діючих «зелених» тарифів зумовить необхідність пошуку джерел фінансування дорогої «зеленої» енергії. В умовах переходу на новий ринок електричної енергії, таким джерелом можуть стати тарифи для населення, які і без того зростатимуть у зв'язку із скасуванням перехресного субсидіювання [92].

Задля уникнення очікуваних політичних та економічних ризиків, зумовлених зростанням тарифів, Україна планує разом з введенням лібералізованого ринку електроенергії запровадити механізм аукціонів для ВДЕ [92].

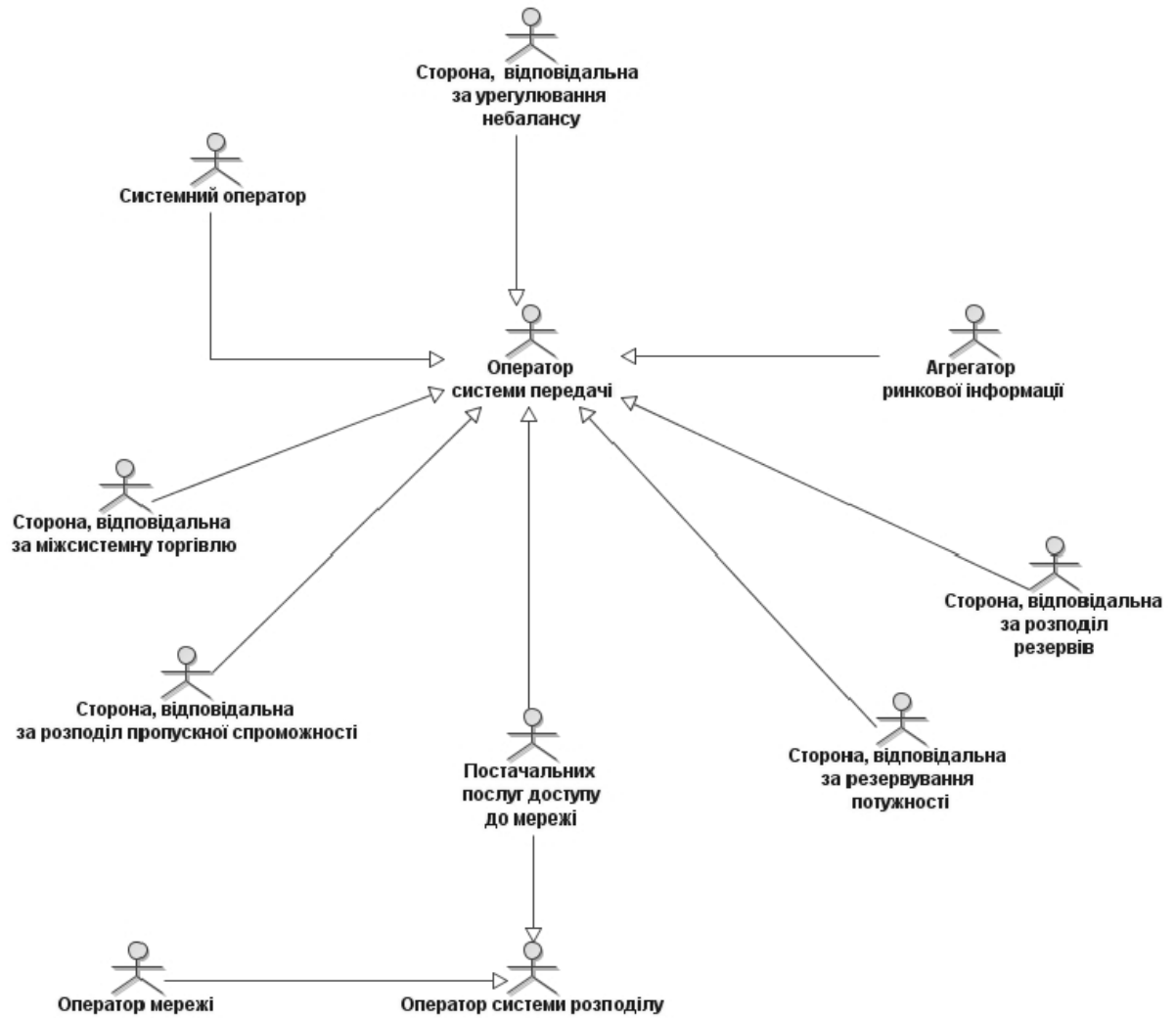


Рисунок 1.3 – Схема взаємовідносин основних учасників лібералізованого ринку електроенергії України [91].



Рисунок 1.4 – Діаграма прецедентів бізнес-сфери «керування енергосистемою» [91]

Важливим елементом «активного» енергокомплексу майбутнього є так званий «prosumer» (producer + consumer) або активний споживач – споживачі, що з'явилися за рахунок розвитку технологій побутових генераторів енергії (сонячних батарей) і «розумних» лічильників, енергоефективних рішень і керування попитом, і які, з часом, можуть стати повноцінними учасниками ринку. Європейський Парламент відніс до категорії активного споживача широке коло суб'єктів [41]:

1) побутові активні споживачі - особи, які виробляють електроенергію на своїй власності, головним чином шляхом за рахунок встановлення сонячних PV панелей на своїх дахах або когенераційних установок

2) колективний активний споживач - кооперативи відновлюваної енергетики під керівництвом осіб, житлові асоціації, фонди, благодійні організації, які не є комерційними суб'єктами, але виробляють енергію, призначену для власного споживання, головним чином за допомогою сонячних PV панелей і вітрових турбін;

3) комерційні активні споживачі - малі та середні підприємства, універмаги, офісні будівлі, промисловість та інші суб'єкти підприємницької діяльності, основна діяльність яких не є виробництвом електроенергії, але які споживають електроенергію, яку вони виробляють, головним чином за рахунок PV установок та когенерації на даху, що призводить до істотної економії коштів;

4) комунальні активні споживачі - школи, лікарні та інші державні установи, які самостійно виробляють електроенергію. «побутовий» (громадяни з наявністю власної мікрогенерації), «колективний» (об'єднання некомерційного характеру), «комерційний».

Системи ЛЕС підключають до системи передачі електроенергії в точці загального підключення, отже вона являє собою контрольовану підсистему загальної мережі. ЛЕС забезпечують високе проникнення джерел розосередженої генерації і при цьому не вимагає зміни конструкції системи

розподілу. Головною особливістю таких систем є забезпечення стабільної роботи при несправностях та порушеннях режимів мережі. Автономна робота здійснюється шляхом розмикання статичного перемикача, що відключає ЛЕС від основної мережі. Джерела РГ і відповідні навантаження можуть бути автономно відокремлені від системи розподілу, щоб ізолювати Microgrid від порушень під час аварій у мережі. Крім того, системи ЛЕС можна навмисно відключити, коли в системі падають показники якості електроенергії. Після ізолювання ЛЕС від основної мережі джерела живлення системи несуть відповідальність за підтримання напруги і частоти, при перетоках потужності всередині виділених систем.

Структура ЛЕС і системи керування нею залежить від кількості, потужності і роду розосереджених енергоресурсів, які входять в неї. Функції керування розосередженими енергоресурсами можуть виконувати локальні системи керування кожного агрегату. Однак зі зростанням кількості об'єктів керування в ЛЕС неможливо обійтися без автоматизованої інформаційно-керуючої системи, яка повинна здійснювати координоване і оптимальне керування всіма розосередженими енергоресурсами, мінімізуючи витрати на паливо, закупівлю енергії на ринках і технічне обслуговування обладнання, підвищуючи доходи від продажу енергії та надання системних послуг (цінозалежне споживання, регулювання частоти і напруги) [42]. Такі системи керування отримали загальну назву Distributed Energy Resource Management System (DERMS).

Саме DERMS відповідає за взаємодію з «великою» енергосистемою, яку, в свою чергу, відображає DMS (Distributed Management System) енергетичної компанії. DMS встановлює «межі» і норми, щоб при приєднанні ЛЕС, вона не завдала шкоди мережі через можливі замикання, порушення напруги, неправильну топологію [43].

Поява відновлюваних та розосереджених джерел енергії призвело до значних змін у роботі та плануванні систем розподілу. При підключенні розподілених джерел енергії, шини навантаження стають так званими шинами

активних споживачів. Активний споживач визначається як споживач електроенергії з можливістю місцевого виробництва енергії. Оскільки енергія виробляється і споживається локально, поява активних споживачів призводить до зміни потоків активної потужності в розподільних мережах, включаючи можливу появу протилежних потоків активної енергії від активних споживачів до електростанції. Крім локального виробництва активної потужності, активні споживачі також спричиняють місцеве виробництво реактивної потужності за допомогою силових електронних пристроїв. При місцевому виробництві реактивної потужності можна контролювати потоки реактивної потужності в розподільній мережі, що дозволяє безпосередньо контролювати втрати активної потужності в системі розподілу. Розвиток питання керування діяльністю активного споживача представлена в роботах [2,6].

Якщо електроенергетика розвивається в напрямку побудови місцевих центрів обміну електроенергією, то їх географічне розташування та розподіл генераторів дуже важливі з точки зору ефективності торгівлі та стійкості місцевих енергетичних ринків. Зокрема, кластеризація розосереджених генераторів на локальних енергетичних ринках є дуже важливою через зростання споживання електроенергії в залежності від відстані між продавцями та покупцями. Крім того, локальний енергетичний ринок стає “несправедливим”, якщо розподілені генератори енергії зосереджені на певному локальному енергетичному ринку [6].

Під час виконання магістерської дисертації було проведено компаративний аналіз літературних джерел за запропонованими критеріями розподілу, що наведено в табл. 1.1.

Проведений аналіз показав, що для вирішення задач, пов’язаних з аналізом структури, параметрів, режимів та процесів на енергетичних ринках в ЛЕС, взаємодії елементів електричної системи та створенням систем контролю енергетичними процесами доцільно розглянути наступні питання: аналіз моделей ринкових процесів; прийняття оптимальних рішень на рівні

незалежного системного оператора та оператора системи розподілу; аналіз моделей керування кінцевим споживачем; оптимізація взаємодії джерел розосередженої генерації і електромережі та інші

Таблиця 1.1 – Розподіл літературних джерел за критеріями.

Проблеми, що вирішуються	Рівень дослідження та впровадження результатів		
	Кінцевий споживач	Локальна енергосистеми	Енергопостачальна організація
1. Керування попитом на енергоресурси	[4,7,8,12,13,15,18,26] 20	[4,5,7,8,9,12,15,21] 22	[8,9,31,32,33,34] 6
2. Взаємодія з активним споживачем	[1,10,11,22,23,24,29] 8	[1,6,10,11,22,24,29] 10	[1,6,10,24] 4
3. Моделі та ринкові процеси в енергетиці	[10,22,23,24,27,31] 8	[6,10,22,23,24,27,30] 10	[6,10,24,30,31,34] 7
4. Інтелектуальні системи керування енергетичними об'єктами та процесами	[16,17,19,21,29,36] 6	[3,4,8,16,17,19,21] 12	[3,8,17,28,33,36] 6
5. Компенсація реактивної потужності	[14,16,19,21] 4	[5,14,16,19,21] 5	-
6. Мультиагентні системи керування в енергетиці	[17,18,19,20,21,37] 6	[17,18,19,20,21] 5	[17] 1
7. Моделювання та реконфігурація систем електропостачання	[15,16,19,20,21,25,26] 10	[2,9,14,15,19,20,21] 11	[2,28,33] 3
8. Дія джерел розосередженої генерації	[11,13,20,21,25] 8	[5,11,13,20,21,25] 10	[31,32,34] 3

Відносно проблем, що вирішуються в літературних джерелах, запропоновані наступні критерії:

- 1) керування попитом на енергоресурси;
- 2) взаємодія з активним споживачем;
- 3) моделі та ринкові процеси в енергетиці;

- 4) інтелектуальні системи керування енергетичними об'єктами та процесами;
- 5) компенсація реактивної потужності з метою підвищення енергоефективності та надійності електричних мереж;
- 6) мультиагентні системи керування в енергетиці;
- 7) моделювання та реконфігурація систем електропостачання;
- 8) дія джерел розосередженої генерації.

Нижче наведено передові технології, які доцільно використати в умовах України задля розвитку національної енергетичної сфери згідно положень концепції Smart Grid.

1.2 Стан альтернативної енергетики та гнучкої генерації в Україні

Близько 80% сумарного світового споживання енергії сьогодні поки ще забезпечується за рахунок викопних органічних ресурсів: нафти, вугілля і природного газу. У виробництві найбільш цінного виду енергії - електричної - вугілля, газ і нафта також є основними первинними джерелами енергії (більше 65%), хоча значний внесок в цей сектор енергетики вносять також традиційні гідро- та атомні електростанції (в сумі понад 30%).

Ресурси відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) в багато разів перевершують сьогоdnішній і прогнозований на доступний для огляду період часу рівень енергоспоживання. Використання ВДЕ, як правило, не робить серйозного негативного впливу на навколишнє середовище, в більшості своїй вони є екологічно чистими і повсюдно доступними джерелами енергії. На відміну від викопних (в тому числі ядерних) палив, ресурси ВДЕ більш-менш рівномірно розподілені по території земної кулі, не перебувають у монопольному володінні обмеженого числа країн і тому розглядаються як джерела енергії, використання яких сприяє підвищенню енергетичної безпеки багатьох країн, зниження залежності від імпорту енергетичних ресурсів і відповідно зміцненню політичної стабільності в світі.

Важливо підкреслити, що частка обсягів використання відновлюваних джерел енергії, яка припадає на країни, що розвиваються становить менше 40%, в той час як на розвинені країни – більше 60%. Цей факт спростовує поширену думку, що використання ВДЕ - доля країн, що розвиваються зі слабо розвинутою енергетичною інфраструктурою. Основним мотивом прискореного розвитку відновлюваної енергетики в Європі, США і багатьох інших країнах є турбота про енергетичну безпеку і екологічна стурбованість. Так, в Європейському союзі прийнята програма досягнення вкладу ВДЕ в енергетичний баланс до 2020 року до 20%, а до 2040 року – до 40%.

В майбутньому енергоспоживання буде тільки збільшуватися. В даний час 85% всіх енергоустановок працюють на викопному органічному паливі. Запаси корисних копалин на Землі досить великі, але найбільш доступні родовища дешевих і легко видобувних нафти і природного газу в даний час вже майже вичерпані. Збільшення видобутку вимагає все більших витрат, які будуть неухильно зростати. Таким чином, одна частина проблем є економічною. Інша частина проблем - політична. Велика частина енергії, що споживається розвиненими країнами, імпортується з інших регіонів світу, і тому постає питання про енергетичну безпеку цих країн. Існують також певні технологічні труднощі, пов'язані з необхідністю розвідки і видобутку викопного палива у віддалених районах. Однак головною все-таки представляється екологічна проблема. Оскільки викопне органічне паливо все ще залишається найбільш дешевим джерелом енергії, то більшість енергетичних об'єктів працює саме на ньому. Це призводить до величезних викидів шкідливих речовин в атмосферу, і ми швидко наближаємося до ситуації, коли це може викликати катастрофічні наслідки.

Залучати природні джерела для генерації енергії, такі як вітер та сонце на сьогоднішній день практикують багато країн в світі. Оскільки їх потенціал практично невичерпний, та не завдають шкоди навколишньому середовищу. Одним із недоліків таких систем є досить дороге обладнання. Інвестори

повертають кошти у кращому випадку через 5-6 або і більше (до 10 -12) років. Проте і це не є причиною відмови від такої ідеї [47].

Останніми роками спостерігається явно виражена тенденція розробки і використання мережевих вітроустановок все більшої одиничної потужності. Так якщо ще в 1996 р середня потужність встановлюваних вітротурбін була на рівні 500-750 кВт, то в даний час вітрові електростанції створюються переважно з одиночних вітроагрегатів потужністю 1-2 МВт. Ведуться активні розробки вітроустановок одиничною потужністю більше 5 МВт.

Світова енергетика розвивається по шляху диверсифікації джерел і систем енергопостачання, серед яких, безумовно, знайдуть своє місце для широкого практичного використання і фотоелектричні перетворювачі сонячної енергії (ФЕП). ФЕП безперервно удосконалюються, а їх вартість знижується. Разом з тим порівнювати ФЕП з іншими системами перетворення енергії тільки з точки зору інвестиційних витрат досить складно. Важливо враховувати, що, оскільки ФЕП не потребують будь-якого палива, вони характеризуються виключно низькими експлуатаційними витратами, однак вироблення електроенергії за допомогою ФЕП можлива тільки в сонячні дні. Середня потужність ФЕП, оснащених пристроями стеження за сонцем, виявляється менше половини пікової потужності, що досягається опівдні при ясному небі, а середня потужність ФЕП без пристроїв стеження складає майже четверту частину пікової потужності. Через мінливості потоку сонячного випромінювання ФЕП, як правило, оснащуються акумуляторами енергії або резервними електрогенераторами, використання яких істотно збільшує капітальні витрати. Виняток складають ФЕП, що використовуються для покриття пікових навантажень, які збігаються з періодом максимальної інтенсивності сонячного випромінювання, а також ФЕП, які під'єднані до електричної мережі і тому не потребують використання акумуляторів.

Ефективність фотоелектричних установок перетворення енергії істотно нижче, ніж ефективність теплових або гідроелектростанцій. У нових кристалічних кремнієвих перетворювачів ККД ФЕП може досягати 20%, а для

недорогих тонкоплівкових перетворювачів всього близько 5%. Однак ККД фотоелектричних установок грає все ж не найголовнішу роль. Більш важливою характеристикою є ціна пікової потужності. Фотоелектрична установка з низьким ККД могла б бути цілком конкурентоспроможною, якби вартість 1 Вт її пікової потужності була близько 20 центів (якщо така вартість коли-небудь виявиться досяжною). Традиційні гідро теплові електростанції мають питому вартість на рівні 1 дол., а АЕС - на рівні 5 дол. за 1 Вт встановленої потужності. Але ці енергоустановки на відміну від ФЕП можуть працювати безперервно і, таким чином, виробляти набагато більше енергії.

В Україні станом на кінець 2017, початок 2018 року встановлена пікова потужність сонячних електростанцій становить 742 МВт [49]. На кінець першого півріччя 2018 року близько 4660 приватних домогосподарств встановили сонячні панелі загальною потужністю майже 90 МВт [50]. Лідерами встановлених приватних СЕС є Київська, Дніпропетровська, Тернопільська області. Пояснюється така популярність так званим “зеленим тарифом”. Його суть полягає в тому, що різницю між виробленою та спожитою електроенергією за рахунок сонячних електростанцій, споживач продає у мережу. Законодавчо встановлено, що електроенергія, котра постачається до мережі по “зеленому тарифу”, повинна 100% бути куплена у споживача. Тому, в Україні сонячна електроенергетика дозволяє не лише піклуватися про екологічний стан, а й заробити гроші приватним домогосподарствам.

Встановлена потужність об’єктів відновлювальної енергетики, що працюють за “зеленим” тарифом в Україні, показано на рис. 1.5 [51].

18 серпня 2017 року Кабінетом Міністрів України було схвалено Енергетичну стратегію України на період до 2035 року. Зростаюча конкуренція на світових енергетичних ринках та стрімкий науково-технічний прогрес у розвитку ВДЕ та використанні альтернативних видів палива розширюють для України можливості щодо вибору джерел і шляхів постачання первинних енергетичних ресурсів, оптимізації енергетичного міксу та, в перспективі, зменшення викидів парникових газів [54]. Основні

показники згідно Міністерства енергетики та вугільної промисловості України наведені в табл. 1.2.

Згідно цієї стратегії, дуже важливим питанням є запровадження відновлювальних та альтернативних джерел енергії на території України.

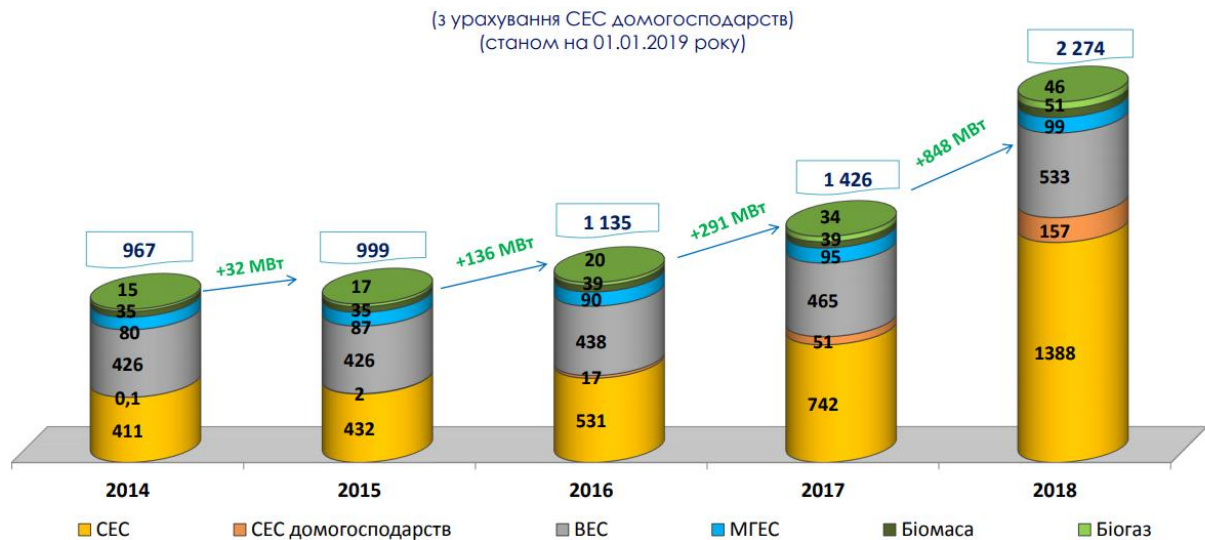


Рисунок 1.5 – Встановлена потужність об’єктів відновлювальної енергетики, що працюють за “зеленим” тарифом в Україні [51]

Таблиця 1.2 – Основні показники Енергетичної стратегії України до 2035 року

Показник	2015 рік	2035 рік
Енергоємність ВВП України	0,28 т.н.е./тис \$ США	0,13 т.н.е./тис \$ США
Імпортозалежність країни	51,6 %	<33%
Інтеграція з енергосистемою Європи	Ні	Так
Забезпечення газом	Імпорт	Експорт
Втрати енергії	>12%	<7.5%
Частка ВДЕ	4%	25%

Головною проблемою використання вищерозглянутих джерел є їх імовірнісний характер їх вихідної потужності. Як відомо, електроенергія як товар має свою особливість, а саме нерозривність у часі генерування зі споживанням. Тому, імовірнісний характер роботи створює проблеми використання сонця та вітру як джерела енергії. Це питання вирішується за допомогою прогнозування та запровадження систем акумуляції

електроенергії. Характер зміни рівня генерованої потужності ВЕС та СЕС представлено на рис. 1.6 [55].

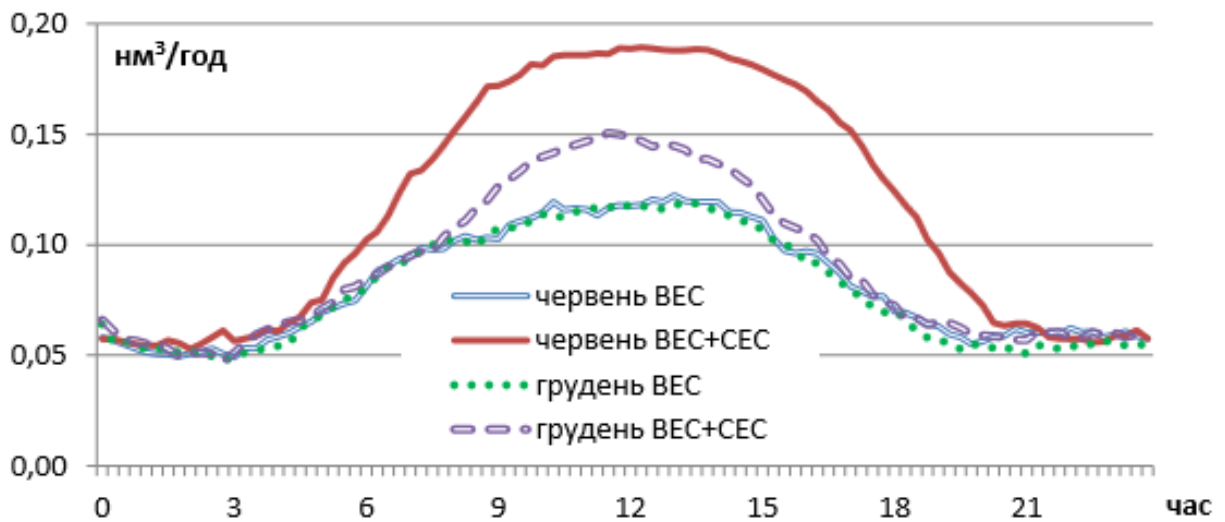


Рисунок 1.6 – осереднена сумарна потужність ВЕС та СЕС [55]

1.3 Керування попитом на енергоресурси

1.3.1 Модель оптимізації на ринку реагування на попит

Стратегія ISO (Independent System Operator): На ринку DRX (Demand Response Exchange – реагування на попит), ISO першим запускає модель IHED (інтегрованої диспетчеризації тепла та електроенергії) для визначення планування генераторних блоків і агрегаторів будівель протягом наступних кількох інтервалів часу [12]. Відомі методи комбінованої оптимізації електроенергії та теплової енергії можна знайти в роботах [20, 21]. Метою диспетчерської моделі є максимізація соціального добробуту, як показано в (1). Крім виходів генерації в реальному часі ($P_{E,P}^{genl}$, $P_{H,\phi}^{genl}$, $P_{E,\phi}^{genl}$), змінні, які повинні бути оптимізовані, є бажаною силою балансування ($\Delta P_{E,i}^{req}$, $\Delta P_{H,i}^{req}$) як різниця між потребами енергії до DR ($P_{E,i}^{dem0}$, $P_{H,i}^{dem0}$) і потребує енергії в реальному часі та після DR ($P_{E,i}^{deml}$, $P_{H,i}^{deml}$). Слід зазначити, що індекси “ t ” для всіх змінних пропущені для простоти. Формулювання моделі IHED має вигляд (1.1, 1.2), показаний нижче.

У співвідношенні (1.1) перша частина позначає загальну користь споживачів, тоді як друга і третя складові позначають собівартість генеруючих енергоблоків тільки для виробництва електроенергії та вартість генерації когенераційних установок відповідно. Слід зазначити, що вартість генерації енергії з ВДЕ тут дорівнює нулю:

$$\max F = \sum_{t=1}^{NT_H} \left(\sum_{i=1}^{N_A} R_i (P_{E,i}^{dem0} + \Delta P_{E,i}^{req}, P_{H,i}^{dem0} + \Delta P_{H,i}^{req}) - \sum_{\phi=1}^{N_{\phi}} C_{\phi}^{gen} (P_{E,\phi}^{gen1}, P_{H,\phi}^{gen1}) - \sum_{\varphi=1}^{N_{\varphi}} C_{\varphi}^{gen} (P_{E,\varphi}^{gen1}) \right) \quad (1.1)$$

Обмеження балансу електроенергії та теплової енергії виражаються наступним чином:

$$\begin{aligned} \sum_{\varphi \in \Psi_n} P_{E,\varphi}^{gen1} + \sum_{\phi \in \Psi_n} P_{E,\phi}^{gen1} + \sum_{\omega \in \Psi_n} P_{E,\omega}^{gen1} - \sum_{i \in \Psi_n} (P_{E,i}^{dem0} + \Delta P_{E,i}^{req}) &= \\ &= \sum_{p \in \theta_n} V_n V_p [G_{np} \cos(\delta_n - \delta_p) + B_{np} \sin(\delta_n - \delta_p)] \quad (1.2) \\ \sum_{\varphi \in \Psi_n} P_{E,\varphi}^{gen1} + \sum_{\phi \in \Psi_n} P_{E,\phi}^{gen1} - \sum_{i \in \Psi_n} (P_{H,i}^{dem0} + \Delta P_{H,i}^{req}) &= \sum_{p \in \Psi_n} P_{H,np}^{line} \end{aligned}$$

де $\phi \in \Psi_n$ ідентифікує теплогенеруючий блок, розташований на шині n ; $p \in \theta_n$ ідентифікує шину p , сполучену з шиною n .

1.3.2 Стратегія балансування потужності оператора розподільної системи

Передбачається, що при наявності інформації про величину необхідної балансувальної потужності DSO (Distribution System Operator) буде заохочувати агрегаторів реагувати на вимогу балансування потужності шляхом коригування поведінки споживачів електроенергії [12]. З точки зору DSO, кожен агрегатор може розглядатися як прибутковий і незалежний агент; тому агрегатори можуть надати відповідну кількість балансувальної потужності, якщо їм запропонують належні стимулюючі ціни. Стратегія DSO моделюється як оптимізаційна задача, яка мінімізує відхилення між бажаною

потужністю балансування та фактичною балансувальною потужністю, що надається ДРГ. Задача формулюється як дворівнева, де задача нижнього рівня відображає оптимальну стратегію агрегатора, а задача на вищому рівні сприяє мінімізації відхилення між бажаною ($\Delta P_{E,n}^{req}$, $\Delta P_{H,n}^{req}$) балансувальною потужністю і фактичною балансувальною потужністю, що забезпечується DRX ($\Delta P_{E,n}^{avi}$, $\Delta P_{H,n}^{avi}$).

Задача верхнього рівня:

$$\min \sum_{t=1}^{NT_H} (\varepsilon_{E,n} |\Delta P_{E,n}^{avi} - \Delta P_{E,n}^{req}| + \varepsilon_{H,n} |\Delta P_{H,n}^{avi} - \Delta P_{H,n}^{req}|), \quad (1.3)$$

за обмежень:

$$\begin{aligned} \Delta P_{E,n}^{avi} &= \sum_{i \in \Psi_n} \Delta P_{E,i}^{avi} = \sum_{i \in \Psi_n} P_{E,i}^{dem} - P_{E,i}^{dem0}; \\ \Delta P_{H,n}^{avi} &= \sum_{i \in \Psi_n} \Delta P_{H,i}^{avi} = \sum_{i \in \Psi_n} P_{H,i}^{dem} - P_{H,i}^{dem0}; \\ P_{E,i}^{dem}, P_{H,i}^{dem} &\in LP. \end{aligned} \quad (1.4)$$

Задача нижнього рівня:

$$\max \sum_{t=1}^{N_T} (R_i(P_{E,i}^{dem}, P_{H,i}^{dem}) - p_e P_{E,i}^{dem} - p_h P_{H,i}^{dem}), \quad (1.5)$$

за обмежень:

$$\begin{aligned} P_{E,i}^{dem} &= \sum_{j \in \Xi_t} L_{E,IMP,j}^{bui}; \\ P_{H,i}^{dem} &= m_j C_w (T_{s,i} - T_{r,i}) = \frac{L_{H,IMP,j}^{bui}}{1 - v_{loss}}; \\ m_i &= \sum_{j \in \Xi_t} m_j; \end{aligned} \quad (1.6)$$

$$L_{E,IMP,j}^{bui} = L_{E,ES,j}^{bui} + L_{E,E0,j}^{bui}, L_{H,ALL,j}^{bui} = L_{H,ES,j}^{bui} + L_{H,IMP,j}^{bui}; \quad (1.7)$$

$$\left(\begin{array}{l} \tau_a^{t+1} - \tau_a^t = \frac{\Delta t}{c_a} (-u_{a-h}(\tau_a - \tau_h) - u_{a-0}(\tau_a - \tau_0) - L_{H,ALL}^{bui}) \\ \tau_h^{t+1} - \tau_h^t = \frac{\Delta t}{c_h} (u_{a-h}(\tau_a - \tau_h) - u_{h-0}(\tau_h - \tau_0)) \quad \forall j \\ \tau_a^{min} \leq \tau_a^t \leq \tau_a^{max} \end{array} \right). \quad (1.8)$$

У виразі (1.3) $\varepsilon_{E,n}$ та $\varepsilon_{H,n}$ – зважені коефіцієнти, які позитивно корелюють з абсолютним значенням $\Delta P^{req}_{E,n}$ і $\Delta P^{req}_{H,n}$. Рівняння (1.3 – 1.8) відображають стратегію агрегатора для максимізації його переваги шляхом контролю поведінки енергоспоживання у відповідь на поточні ціни на електричну та теплову енергію. Рівняння (1.6) позначає взаємозв'язок між енергетичними потребами агрегатора та вимогами кінцевих споживачів. Рівняння (1.7) відображає баланс потужності в будівлі.

Задача дворівневої оптимізації може бути перетворена в стандартну задачу оптимізації шляхом заміни задач низького рівня їх умовою оптимальності Караша-Куна-Таккера, тоді задача може бути вирішена за допомогою методу первинно-подвійних точок внутрішньої точки [15].

1.4 Взаємодія з активним споживачем

Поява активних споживачів змінює ролі кінцевих споживачів у системі розподілу енергії від пасивного придбання електроенергії, до активного планування попиту та генерації відповідно до індивідуальних потреб. Це також робить можливим вивчення місцевих ВДЕ, а також переваги як гравців, так і системи. Однак новий сценарій приносить надзвичайну складність вивчення та керування. Виникає необхідність розробки нових підходів та інструментів для розуміння системи розподілу енергії, особливо для тих, хто приймає політичні рішення. Запропонована чотиришарова структура може вивчати інтерактивну поведінку активних споживачів під керівництвом мікро-гравців. Нова інтелектуальна мережа може відкрити нове бачення функціонування енергосистем і дозволить створити самоорганізовану спільноту активних споживачів з абсолютно новим підходом. Важливе

значення в рамках злиття мають соціальні та технічні взаємодії, які впливають на глобальну продуктивність та потреби прагнути до макроконтролю власних зацікавлених мікро-гравців, які взаємодіють на соціальному та мережевому рівнях. Регулювання може бути здійснене за допомогою зовнішнього стимулювання як з точки зору цінових, так і соціальних цінностей. Іноді соціальні цінності можуть бути більш ефективними, ніж цінові сигнали. Результати показують, що для максимізації ефективності політики слід ретельно розвивати відповідну соціальну культуру [1].

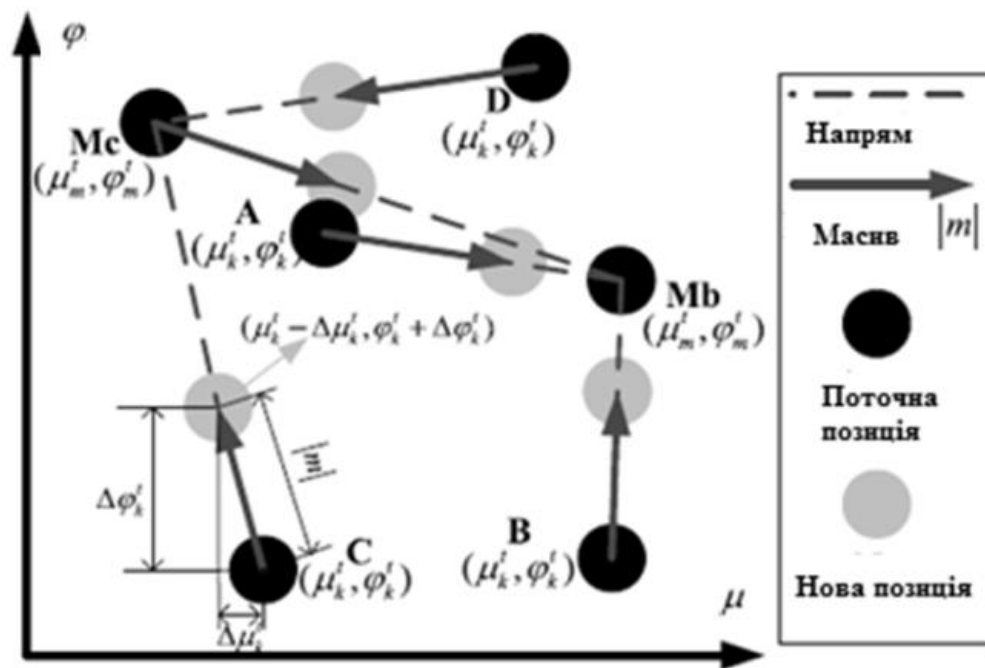


Рисунок 1.7 – Процедура адаптації стану активного споживача

$$E_k^t = g_k^t - d_k^t ; \quad (1.9)$$

$$g_k^t = g_{nk}^t [1 - \mu_k^t (1 - \varphi_k^t) \bar{v}_k^t \vartheta_{k,g}] ; \quad (1.10)$$

$$d_k^t = d [1 - \mu_k^t (1 - \varphi_k^t) \bar{\rho}_k^t \vartheta_{k,d}] ; \quad (1.11)$$

$$\Delta \mu_k^t = |m| (\mu_m^t - \mu_k^t) / \sqrt{(\mu_m^t - \mu_k^t)^2 + (\varphi_m^t - \varphi_k^t)^2} ; \quad (1.12)$$

$$\Delta \varphi_k^t = |m| (\varphi_m^t - \varphi_k^t) / \sqrt{(\mu_m^t - \mu_k^t)^2 + (\varphi_m^t - \varphi_k^t)^2} ; \quad (1.13)$$

Чотиришарова структура об'єднує соціальну мережу, передові інформаційні та комунікаційні технології, енергосистеми, в тому числі середні та низькі рівні напруги, а також рішення різноманітних гравців у різних масштабах:

1. У соціальному шарі активний споживач вирішує свої соціальні уподобання на кожному соціальному інтервалі часу: керований вигодами чи керований комфортом. Потім він знаходить у своєму суспільному колі модель активного споживача з тими ж вигодами, який отримав максимальну користь або комфорт від останнього інтервалу часу керування. Після цього він налаштовує свій стан до моделей активного споживача;

2. Інформаційно-комунікаційний технологічний шар надає засоби комунікації для збору та передачі даних щодо оперативних станів, самоорганізованих торгів, результатів ринку місцевих громад та поточного режиму регулювання;

3. На фізичному рівні, користувачі можуть генерувати і споживати з електромережі електроенергію. Крім того, традиційні генератори і навантаження також під'єднанні до цього шару. Експлуатаційна безпека цього шару покладається на місцевого координатора електроенергії;

4. Рівень прийняття рішень є віртуальним і приватним місцем для гравців, який аналізує та уточнює інформацію з рівня інформаційно-комунікаційних технологій, а потім реагує на основі індивідуальні цілі та обмеження.

Структура моделювання містить найбільш типові характеристики та взаємодії кожного гравця, абстраговані від кожного шару на рис. 1.8. Таким чином, гравці можуть бути розділені на дві загальні групи: мікро-гравці, тобто активні споживачі, і макро-гравці, включаючи агрегатор навантаження, локальний координатор електроенергії та регулятор. Макро-гравці встановлюють правила, контролюють всю систему, збирають інформацію та видають необхідні сигнали.

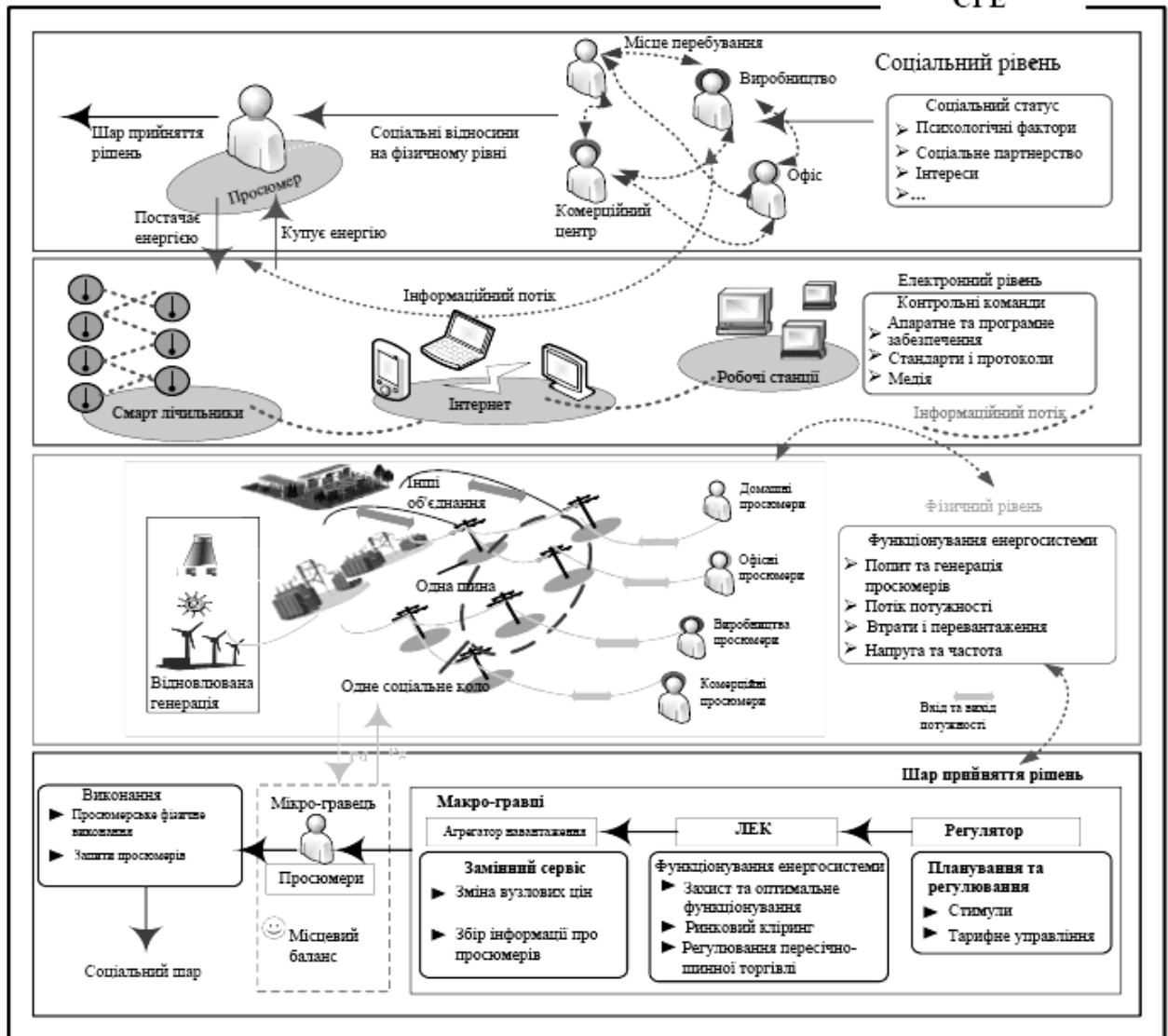


Рисунок 1.8 – Багатошарова структура симулювання для систем розподілу електроенергії.

Активні споживачі надають інформацію про останній комфорт і користь та ставлення до них в кожному соціальному інтервалі часу в тому ж контрольному інтервалі часу в однаковому колі суспільства. В кожному контрольному інтервалі часу активні споживачі аналізують історичні ціни, щоб передбачити можливі коливання цін на споживання та генерацію. На основі нещодавно оновленої соціальної інформації та економічних сигналів від макро-гравців активні споживачі розраховують власну генерацію та попит, враховуючи ліміти генерації та попиту на наступний контрольний інтервал часу. Після самозабезпечення роль активного споживача визначається як

продавець (генерація в надлишку) або покупець (дефіцит покоління). Під час участі в торгівлі в кожному контрольному інтервалі часу, споживач використовує стратегію, що не зменшує прибуток, щоб сформувати кінцеву цінову пропозицію. У кожному контрольному інтервалі часу самоорганізовані переговори щодо цін і кількості серед активних споживачів в межах одного кола комунікації або на одній шині розглядають також балансувальні премії і циклічний заряд.

Агрегатор навантаження надає послуги від імені активних споживачів, бере участь у ринку місцевих громад на основі модифікованих вузлових цін, а також збирає інформацію про самоорганізовані крос-шинні угоди та їхні відповідні коригувальні ставки для подання до ринку місцевих громад. Після отримання уточнених обсягів споживання та генерації та вузлових цін від ринку місцевих громад, агрегатор навантаження перераховує ціни на споживання та генерацію, щоб отримати плату за послугу. Потім уточнені обсяги та змінені ціни відправляються назад до відповідних посередників.

Локальний координатор електроенергії керує ринком місцевих громад, використовуючи котирування з агрегатора навантаження, малих традиційних генераторів і навантажень в одній громаді, спрямовану на забезпечення найбільш ефективних стимулів, щоб спонукати поведінку учасників ринку до бажаного результату (наприклад, максимізацію соціального надлишку, мінімізація загальних збитків тощо) при дотриманні оперативних обмежень. Обмін енергією з іншими громадами також розглядається як одне з завдань локального координатора електроенергії.

Обмін енергією з іншими громадами також розглядається як одне з завдань локального координатора електроенергії. Оскільки локальний координатор електроенергії не може безпосередньо керувати попитом і генерацією активних споживачів, він використовує вузлові ціни як економічні стимули для прийняття рішень активних споживачів щодо їхнього попиту та генерації, що приводить всю систему до бажаного стану.

Регулятор, як єдиний макро-гравець, що робить політику в системі, відповідає за моніторинг функціонування ринку та ефективність всієї системи. «Загальний контроль» системи може виконуватися регулятором лише за допомогою правил.

1.5 Моделі та ринкові процеси в енергетиці

1.5.1 Модель локального енергетичного ринку

Нижче наведено модель локального енергетичного ринку (ЛЕР), що керується подіями, для сприяння торгівлі енергією на рівні розподілу [10]. Споживач електроенергії обирає свої місцеві стратегії торгівлі енергією, враховуючи наявні енергетичні ресурси. Задача побудована як Марковський процес прийняття рішень, а її розв'язок визначається за допомогою нових досягнень в технології підкріплення, а саме глибоке навчання. Цей інноваційний ЛЕР не має на меті замінити будь-які існуючі енергетичні послуги, а також не запропоновано як кращу ринкову парадигму. Натомість він намагається переважно диверсифікувати енергетичну екосистему на межі розподільних мереж і кінцевих користувачів.

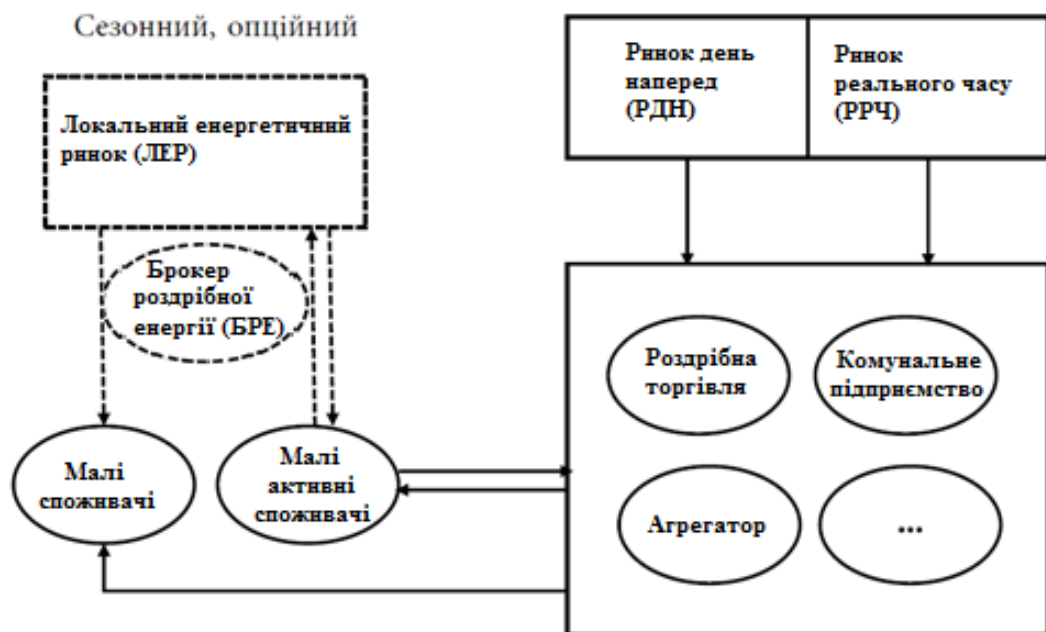


Рисунок 1.9 – Локальний енергетичний ринок за участі активних споживачів

Для того, щоб порівняти економічну вигоду покупців від торгівлі ЛЕР з торгівлею безпосередньо з комунальною компанією і повністю врахувати стохастичність попиту на ВДЕ та навантаження, а також невизначені ринкові умови, за різних сценаріїв, середньорічну економічну вигоду для кожного споживача можна обчислити наступним чином:

$$\overline{R_{year}} = 365 \cdot r_0 \cdot \frac{1}{N_d N_s} \sum_{k=1}^{N_d} \sum_{i=1}^{N_s} R_{day}(i, k). \quad (1.23)$$

де R_{year} і R_{day} вказують середню щорічну вигоду та щоденну вигоду, досягнуту від торгівлі на локальному енергетичному ринку, відповідно; r_0 означає випадкову ринкову відкриту частку, що визначається керованим подіями на ЛЕР. Як згадувалося раніше, оскільки стратегія інтелектуальної торгівлі перевершує інші за допомогою невизначеного способу, моделювання буде виконуватися для $N_d = 20,999/24 = 874$ дні (епізоди) для різних сценаріїв генерації вітру та вихідної потужності (низький, середній та високий), з $N_s = 3$.



Рисунок 1.10 – Модель цілісного ринку електроенергії.

1.5.2 Модель справедливого аукціону на локальних енергетичних ринках

Для геометричної кластеризації та справедливого аукціону на місцевих енергетичних ринках запропоновано формулювання оптимізації та відповідні алгоритми поліноміального часу. На локальному енергетичному ринку задача оптимізації розглядає точність розосередженого генератора електроенергії для геометричної кластеризації. Для розв'язання задачі оптимізації кластерів запропоновано алгоритм геометричного неконтрольованого навчання на основі очікування та максимізації [6]. Крім того, запропоновано справедливий механізм, заснований на аукціоні Vickrey-Clarke-Groves (VCG), для розрахунку ціни, яка ефективно гарантує найнижчі витрати на локальному енергетичному ринку. Додаткова інтенсивна оцінка ефективності механізму аукціону показала, що запропонований алгоритм є оптимальним з точки зору стабільності мережі, коли всі розгорнуті елементи були правдивими.

Для проведення аукціону запропоновано справедливу схему торгівлі електроенергією на основі аукціону VCG. Аукціон VCG складається з аукціонів із закритими заявками для забезпечення справедливих дій у торгівлі електроенергією. Аукціон VCG – це особливий випадок аукціону Vickrey, де кожна ставка повинна бути справжньою цінністю для збереження корисності. Передбачається, що учасники аукціону складаються з продавця, який є «активним» споживачем з надлишком електроенергії, покупця, який є активним споживачем з дефіцитом електроенергії, та аукціонером, який є місцевим центром обміну електроенергії. На аукціоні покупці звертаються із запитом на електроенергію до аукціонера, а попит буде предметом аукціону. Потім кожен продавець подає заявку на позицію, а ставки відображають фактичну вартість, на яку можуть впливати геометричні відносини з продавцем, а також функція витрат. Запропонована схема запобігає монополії на електроенергію та забезпечує ефективність ринку і сприяє наступному:

1. Справедливість кластеризації: запропонований алгоритм кластеризації базується на геометричній інформації про «активних»

споживачів і знаходить відповідні місця для локальних центрів обміну електроенергією. На додаток до інформації про розташування, операція кластеризації функціонує з урахуванням справедливості розподілених генераторів енергії;

2) Механізм справедливого аукціону: запропонований механізм аукціону побудований на аукціоні VCG, який добре відомий своєю правдивістю. За допомогою інтенсивних оцінок було показано, що при оцінці правдивої поведінки максимізується споживання кожного споживача; таким чином, запропонована схема виявилася правдивою;

3) Обчислювальна ефективність: запропонована задача оптимізації для геометричної кластеризації є NP-складною (NP – non-deterministic polynomial). Тому запропоновано схему, основу за алгоритмом навчання на основі очікування та максимізації, який вирішує проблему в поліноміальний час. Крім того, запропонований аукціонний контроль також є NP-складним.

Розглянута архітектура мережі складається з активних споживачів і розосереджених генераторів. Кожен споживач може генерувати та споживати електроенергію, наприклад, розумні будинки або житлові будинки з використанням ВДЕ. З іншого боку, розосереджені генератори виробляють енергію лише через невеликі генератори. Тому оптимізаційна задача спрямована на збалансування геометричного розподілу локальних енергетичних ринків та забезпечення справедливості розподілу енергетичних генераторів. Для того, щоб сформулювати моделі кластеризації, запропонована схема визначає позначення для набору активних споживачів P , тобто:

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_N\} \quad (1.14)$$

де N – загальна кількість активних споживачів у системі. Передбачається, що кожен активний споживач p_N має геометричний вектор розташування L_{pn} . Подібно до (1.14), набір розподілених генераторів D визначається як:

$$D = \{d_1, d_2, \dots, d_M\} \quad (1.15)$$

де M – загальна кількість генераторів розподіленої енергії; а кожен генератор d_m має геометричні вектори розташування L_{dm} . Якщо електроенергетика вирішить побудувати K місцевих енергетичних ринків, потрібно K місцевих центрів обміну енергією [6].

Запропонована оптимізаційна постановка спрямована на збалансування геометричного розподілу енергетичних генераторів на локальних енергетичних ринках. Тому справедливість розподілу енергії генераторів можна сформулювати наступним чином:

$$\sum_{m=1}^M r_{m,k}^d \leq \left\lceil \frac{M \cdot \omega}{K} \right\rceil \quad \forall x_k, \quad (1.16)$$

де ω – коефіцієнт балансу для справедливості в кластеризації, і $1 \leq \omega \leq K$.

Оскільки ω стає меншим, можна досягти більшої справедливості, тобто розподілені генератори енергії рівномірно розподілені між кластерами при $\omega = 1$, тоді як всі розподілені генератори енергії належать до одного кластеру, коли $\omega = M$. На підставі цього обґрунтування проекту оптимізації, функція вимірювання спотворень DMF (Distortion Measure Function), яка є сумою геометричних відстаней між локальними енергетичними ринковими суб'єктами (активними споживачами або розосередженими генераторами енергії) і локальними центрами обміну енергії визначаються наступним чином:

$$DMF \triangleq \sum_{k=1}^K \left(\sum_{n=1}^N r_{n,k}^p \left| L_n^p - L_k^x \right|^2 + \sum_{m=1}^M r_{m,k}^d \left| L_m^d - L_k^x \right|^2 \right). \quad (1.17)$$

Тому завдання оптимізації передбачає в мінімізацію DMF при обмеженнях системної моделі:

$$\min_{r_{n,k}^p, r_{m,k}^p, L_k^x} DMF ; \quad (1.18)$$

за умови:

$$\sum_{k=1}^K r_{n,k}^p = 1 \quad \forall p_n ; \quad (1.19)$$

$$\sum_{k=1}^K r_{m,k}^d = 1 \quad \forall d_m ; \quad (1.20)$$

$$\sum_{m=1}^M r_{m,k}^d \leq \left\lfloor \frac{M \cdot \omega}{K} \right\rfloor \quad \forall x_k ; \quad (1.21)$$

$$1 \leq \omega \leq K. \quad (1.22)$$

1.6 Компенсація реактивної потужності для підвищення енергоефективності та надійності електричних мереж

Аналітичний метод до постачання реактивної потужності та енергетичного арбітражу, включаючи витрати реактивної потужності та втрати в лініях, що дозволяє ефективно обробляти велику кількість змінних, даючи майже оптимальне рішення в 100 разів швидше порівняно з існуючими методами [5]. Даний метод дозволяє мінімізувати загальну вартість ЛЕС, що підключається до електромережі, яка містить фотоелектричні модулі, акумуляторні системи зберігання енергії та електростанції з електричною зарядкою з можливістю генерування реактивної потужності.

Даний метод підходить як для постачання електроенергії на день наперед, так і в режимі реального часу у великих системах. Також може бути використаний для загальної диспетчеризації енергії з різними параметрами та різними функціями витрат.

Передбачається, що ISO має контроль над системами акумуляції електроенергії і має право залучати невикористану потужність інверторів фотоелектричних систем і електричних бортових зарядних пристроїв, що належать третій стороні, для забезпечення реактивною енергією. Вартість активної потужності з електромережі вже включає в себе чисту вартість зарядки акумуляторних систем зберігання енергії та електромобіля. Останній

вираховується з цільової функції, оскільки вартість зарядки електричного транспортного засобу оплачується приватними власниками. Фотоелектричні системи оплачуються за потужністю, яку вони виробляють для покриття основних інвестицій. Кожен розподілений енергетичний ресурс компенсується за виробництво реактивної потужності. Як наслідок, цільова функція виражається як:

$$Obj = \sum_{t=1}^T [c_t^{Pgrid} P_t^{grid} + c^{Qgrid} Q_t^{grid} + C^{PPV} \sum_{x=1}^M P_{x,t}^{PV} + \sum_{x=1}^M c_{x,t}^{QP} Q_{x,t}^{PV} + \sum_{x=1}^B c_{x,t}^{QBESS} Q_{x,t}^{BESS} + \sum_{x=1}^B c_{x,t}^{BESS,deg} - c_t^{Pgrid} \sum_{x=1}^E P_{x,t}^{EV} + \sum_{x=1}^E c_{x,t}^{QEV} Q_{x,t}^{EV}] H \quad (1.24)$$

де c^{Pgrid}_t і c^{PPV}_t – є відповідно ціною активної потужності з мережі і від PV; c^{Qgrid} і $c^{QX}_{x,t}$ – відповідно витрати реактивної потужності з мережі і з розосереджених джерел енергії (де індекс x і верхній індекс X можуть бути PV / BESS / EV). Активна і реактивна потужність, придбана в мережі, мають символ P^{grid}_t і Q^{grid}_t відповідно. $P^{PV}_{x,t}$ представляє активну потужність, вироблену певною фотовольтаїчною установкою. Позитивні $P^{BESS}_{x,t}$ і $P^{EV}_{x,t}$ являють собою зарядку BESS і EV відповідно, і розглядаються як навантаження, в той час як позитивний $Q^{X}_{x,t}$ являє собою генерацією реактивної потужності з розосереджених джерел енергії. Індекс t показує значення змінних у момент часу t ; H - тривалість періоду часу.

Висновки:

1. В даному розділі визначено фактори і чинники впливу на роботу локальних електроенергетичних систем. Розглянуто принципи побудови локальних систем електропостачання згідно з концепцією Smart Grid. Досліджено питання створення та організації локальних ринків електричної енергії з формалізацією учасників ринку та правил його функціонування.

2. Проведено огляд та класифіковано літературні джерела за основними проблемами, що були порушені в дослідженнях зарубіжних вчених. Було розглянуто передові технології реалізації концепції Smart Grid в енергетичних

системах інших країн, що дозволяє оцінити можливості впровадження передових технологій побудови ЛЕС в умовах України.

3. Виділено перспективні напрямки застосування передових технологій в енергетичній галузі України згідно з її розвитком у рамках концепції Smart Grid. Для ефективного функціонування ЛЕС наведено проблеми, які необхідно вирішити, та їх вирішення, що оптимізують енергетичні процеси в локальних електромережах. До питань, що підлягали вирішенню відносились: оптимальна реконфігурація електричних мереж, генерація та компенсація реактивної потужності та балансування потужності в мережі.

4. З точки зору керування активними споживачами була наведена стратегія на основі чотиришарової структури системи розподілу, що включає технологічні, інформаційні, організаційні та соціальні процеси під час керування активними споживачами. Також було розглянуто процедуру адаптації стану активного споживача, відповідно до власної вигоди та стандартних визначених моделей поведінки активних споживачів. Це дозволяє здійснювати контроль ЛЕС з врахуванням прогнозованої поведінки об'єктів системи.

2 МУЛЬТИАГЕНТНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТА ФОРМАЛІЗАЦІЯ АКТИВНОГО СПОЖИВАЧА

2.1 Мультиагентні системи керування в локальних електроенергетичних системах

2.1.1. Загальна характеристика мультиагентних систем

Дослідження, що розвиваються в даний час, пов'язані з напрямом "інтелектуальні мережі" або Smart Grid, зокрема, спрямовані на дослідження таких їх властивостей як надійність, екологічність, економічність і налаштовуваність на конкретні умови роботи [93, 94]. ЛЕС є різновидом Smart Grid, якій притаманні такі особливості: єдине об'єднання різнорідних розподілених і централізованих джерел енергії, поновлюваних джерел енергії, накопичувачів енергії і різнотипних споживачів [95, 99]. При цьому ЛЕС функціонує як при гібридному енергопостачанні, так і у випадках, коли забезпечується надійне постачання споживачам за умови повного відділення від централізованого джерела, тобто в «острівному» режимі. Важливо відзначити, що Microgrid являє собою комбінацію керованих і некерованих джерел енергії, що ускладнює досягнення балансу потужності в ЛЕС, підвищує актуальність регулювання напруги та співвідношення активної і реактивної потужності в системі.

ЛЕС включає в себе низку цифрових пристроїв, що керують потоками енергії та інформації. Ускладнення завдань керування полягає також в тому, що як потоки енергії, так і потоки інформації є двонаправленими або. Крім того, окремі власники бізнес-процесів (суб'єкти ЛЕС або агенти) в рамках ЛЕС можуть мати свої специфічні критерії ефективності свого функціонування. Загальновизнано, що керування ЛЕС не може бути строго централізованим або децентралізованим.

Мультиагентний підхід як метод формалізації різних процесів і їх взаємодії в системах складної конфігурації представляється перспективним

для використання при вирішенні завдань оптимального керування ЛЕС [95, 98].

Агентно-орієнтовані системи впроваджені в області електротехніки; були прийняті як нові концепції систем управління протягом останніх десятиліть. Ця концепція випливає з інформатики. Широке використання технології агента в електричній області призвело до неоднозначного використання та інтерпретації понять «агент» і «мультиагентні системи»; це особливо очевидно в дослідних роботах з інтелектуальних мереж. Загальне розуміння терміну інтелектуальна мережа в науково-дослідних роботах охоплює розробку нових стратегій управління потужністю та систем зв'язку для вирішення цієї проблеми. Це пов'язано з розширенням використання відновлюваних джерел енергії (наприклад, фотоелектричних систем, вітрових турбін, систем комбінованого теплопостачання) та нових електричних навантажень (наприклад, теплових насосів та електричних транспортних засобів) [44].

Мультиагентні системи керування (МАСК) є одним з новітніх підходів керування для розробки програмних додатків у галузі штучного інтелекту. МАСК складається з ряду окремих суб'єктів, званих агентами, де агенти взаємодіють між собою. Кожна структура може бути агентом. Наприклад, агент може бути пристроєм, комп'ютерною системою, програмним забезпеченням або організацією, що їх володіє. Кожен агент може як самостійно працювати для досягнення певної особистої мети, так і взаємодіяти з іншим агентом, щоб вирішити спільну мету [9]. Використання МАС в інжинірингу енергосистем стає досить поширеним явищем і представлене в літературі різними застосуваннями в різних архітектурах. Агенти - розсіяні компоненти розрахунку в енергосистемі. Вони здатні отримувати дані про напругу, струм та стан системи і діяти на приводи, щоб змінити стан енергосистеми. Як правило, три типи стратегій контролю використовуються для контролю агентів у МАСК. Це централізовані, децентралізовані та гібридні стратегії координації [44].

До переваг МАСК відносять [44]:

- розвиток засобів адаптації до змін середовища, можливість модифікації її структури і параметрів безпосередньо в процесі функціонування;
- застосування динамічного моделювання в реальному часі з прогнозуванням стану енергосистеми;
- організація розподіленого інформаційно-технологічного простору, синхронізованого обміном і оптимізацією взаємодії між різними підсистемами, можливість інформаційного обміну не тільки даними, але й знаннями;
- застосування паралельних обчислень, які дозволяють різко підвищити швидкодію та на порядок економити обчислювальні ресурси;
- здатність здійснювати керування станом технічних комплексів і систем на основі розподілених мережевих інформаційних мереж і гнучкої інфраструктури обчислювальних компонентів.

Можливості МАСК: модифікація структури і параметрів безпосередньо в процесі функціонування; застосування динамічного моделювання в реальному часі з прогнозуванням стану; організація розподіленого керування з оптимізацією взаємодії між підсистемами; можливість обміну як даними, так і знаннями; паралельні обчислення, що підвищують швидкість обчислень при економії обчислювальних ресурсів; керування станом технічних комплексів і систем на основі розподілених мережевих інформаційних мереж і гнучкою інфраструктури обчислювальних компонентів.

Набули поширення три типи архітектури МАСК. Архітектура МАСК на принципах штучного інтелекту використовує методи і засоби символічного представлення знань. Обмеженість архітектури – відсутність підсистеми моделювання для прогнозування своєї поведінки, поведінки інших агентів і зовнішнього середовища. Забезпечується створення точної і повної моделі складного багаторівневого та багатозв'язного динамічного об'єкта, репрезентованої спільнотою взаємодіючих агентів, а також системи керування

таким об'єктом у даній архітектурі неможливо. На рис. 2.1 та 2.2 наведено приклад архітектури інформаційних зв'язків між елементами МАС керування та внутрішню структуру системи локального керування.

Реактивна архітектура використовує методи і засоби символічного представлення знань. Обмеженість архітектури – відсутність підсистеми моделювання для прогнозування своєї поведінки, поведінки інших агентів і зовнішнього середовища. Створення точної і повної моделі складного багаторівневого та багатозв'язного динамічного об'єкта, репрезентованої спільнотою взаємодіючих агентів, а також системи керування таким об'єктом у даній архітектурі неможливо.

Гібридна архітектура реалізує динамічну організаційну модель МАСК ІЕМ і містить ментальну та реактивну підсистеми з доповненням її системою моделювання. Дана модель дозволяє забезпечити агенту можливість вибору стратегії досягнення цілей і певних дій у рамках обраної стратегії, а також забезпечити можливість гнучкої коригування ієрархій в структурі системи інтелектуального керування.

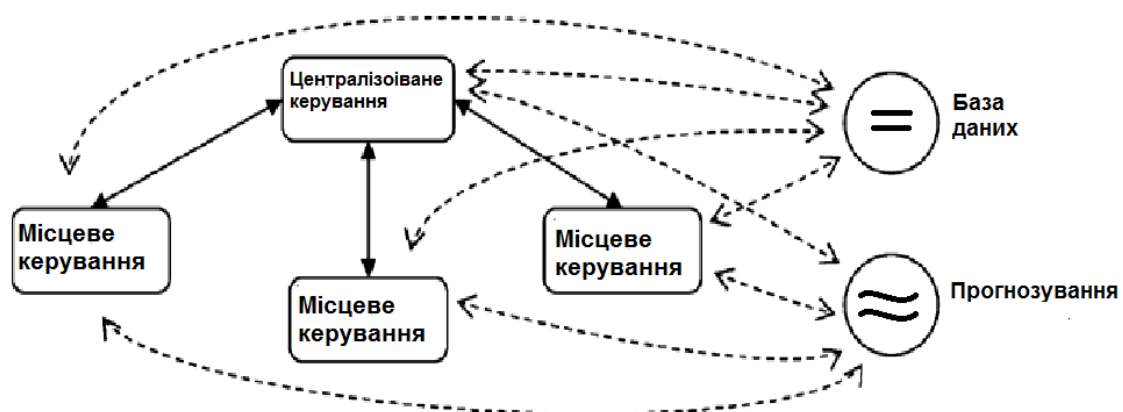


Рисунок 2.1 – Архітектура інформаційних взаємозв'язків МАСК

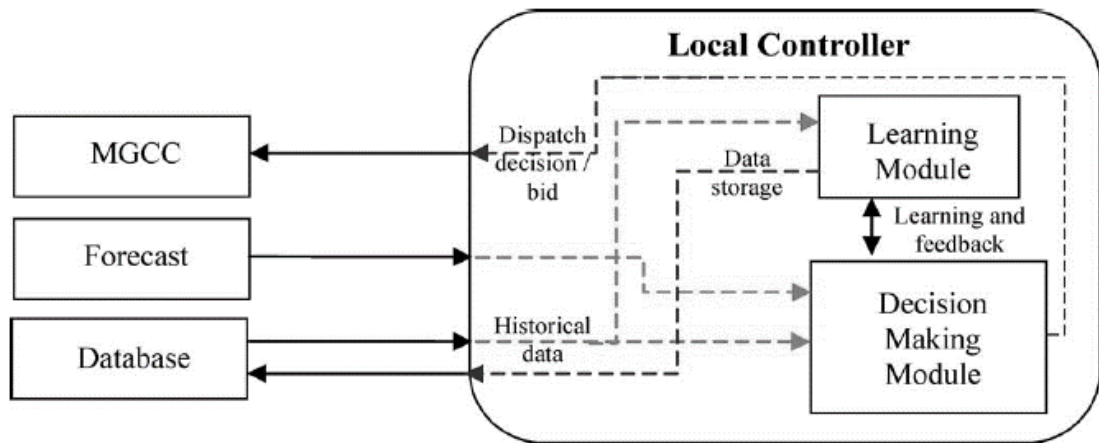


Рисунок 2.2 – Внутрішня структура системи локального керування MASCK

Організаційна модель MASCK описується багатофакторним вектором стану всієї сукупності агентів MASCK, тому доцільно використовувати гібридну архітектуру MASCK, доповнену системою моделювання, що дозволяє агенту забезпечити вибір стратегії і виконати дії для досягнення цілей обраної стратегії і гнучку коригування ієрархій в структурі системи інтелектуального керування [44].

Архітектура MASCK має містити:

- спеціалізовані бази знань (онтологій) для подання інформаційних потреб функціонування різних агентів;
- моделі процесів функціонально повної підсистеми спеціалізованих агентів, забезпечують пошук, уявлення, обробку та розподілення інформації;
- підсистему прогнозуючого моделювання;
- підсистему формування критеріїв і обмежень;
- підсистему моделювання та координації взаємодії між агентами, організації кооперативного поведінки, забезпечення інформаційно-технологічної взаємодії і сумісності агентів;
- підсистему формування керуючих впливів і реалізації керування;
- підсистему аналізу і планування.

2.1.2 Формалізація ЛЕС у вигляді мультиагентної системи

Мультиагентна система є інтелектуальною розподіленою динамічною системою керування, де має місце узгоджена і неузгоджена спільна поведінка і взаємодія агентів. При цьому кожен агент має певну ступінь автономії у встановленій ієрархічній системі [96].

Формулювання поняття "агент" в науково-технічній літературі має багато різних інтерпретацій, іноді обумовлених конкретною предметною областю [95]. Одне з найбільш загальноприйнятих визначень "агента" представлено в [96], де автор визначив "агента" як програмно-апаратний суб'єкт, що знаходиться в деякому навколишньому середовищі і здатний автономно реагувати на зміни в цьому середовищі. Крім того, також сформульовані властивості "інтелектуальних агентів", які повинні володіти реактивністю, цілеспрямованою поведінкою і взаємодією з іншими інтелектуальними агентами [96]. Слід зазначити, що агенти можуть бути однорідні, тобто ті, що мають загальні несуперечні цілі, здатними виконувати однотипні дії, та ті, що оперують загальними областями знання [97]. В іншому випадку, агенти вважаються неоднорідними. Структура МАС з однорідними та неоднорідними агентами показана на рис. 2.3.

На рис. 2.4 приведено формалізоване представлення агента, прийняте в даній роботі з урахуванням основних функціональних характеристик, притаманних агенту: "міркування", "самоналаштування", "оптимізація", "комунікація", "активність", введені на основі запропонованого в роботі [94] підходу .

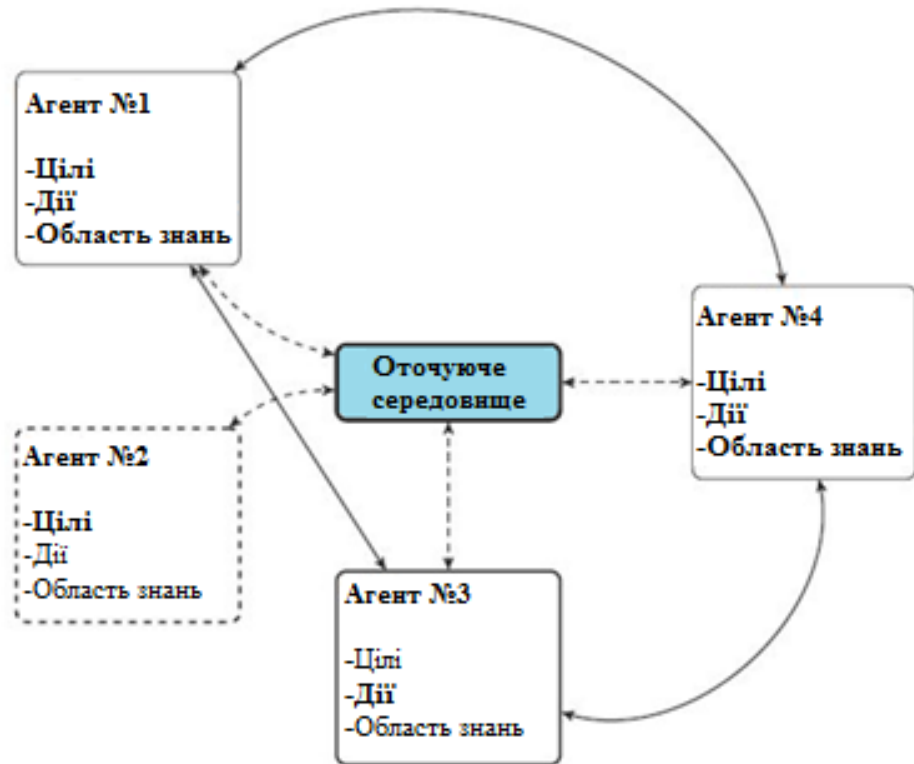


Рисунок 2.3 – Структура МАС з однорідними агентами (№ 1, № 4), неоднорідними, пов'язаними (№ 1, № 3 і № 4) і непов'язаним агентом (№ 2)

Щодо розгляду систем типу ЛЕС, що мають в складі різнофункціональні суб'єкти, будемо вважати, що агенти визначені в класі кібер-фізичних систем, а також є, в загальному випадку, неоднорідними елементами МАС [100].

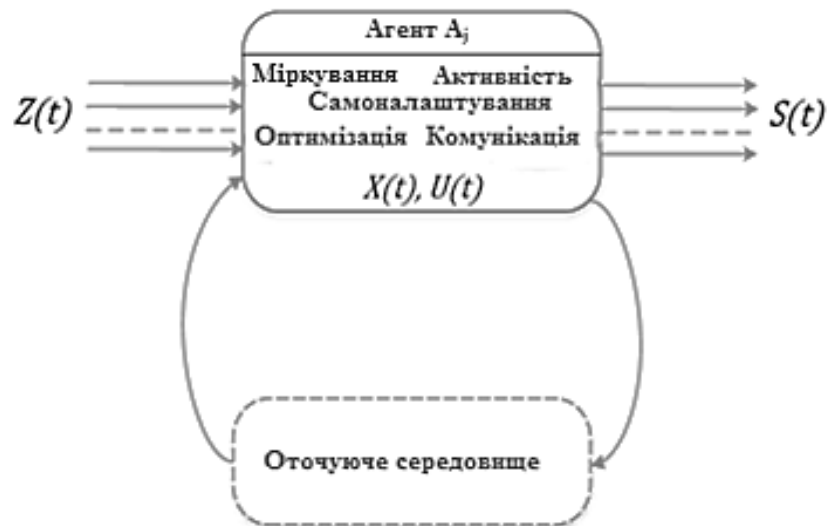


Рисунок 2.4 – Формалізоване відображення агента МАС

На рис. 2.4 прийняті наступні позначення: A_i – агенти; $Z(t)$ – вектор вхідних обмежень і уставок, пов'язаний з функціональною характеристикою "комунікація", при цьому $Z(t) = (L, D^C, D^R)$, де L – технологічні обмеження агента, D^C – вектор вхідних команд, D^R – вектор вхідних рекомендацій; $S(t)$ – вектор станів агента, пов'язаний з його функціональною рисою "активність"; $X(t)$ – вектор параметрів і констант агента, пов'язаний з його функціональною характеристикою "самоналаштування" (щодо параметрів) і "міркування" (щодо констант); $U(t)$ – вектор внутрішніх генерованих керувань агента, пов'язаний з його функціональною характеристикою "оптимізація".

Застосування мультиагентного підходу є перспективною технологією для керування і прийняття рішення в системах, де існує розподілене керування і невизначеність, пов'язана з наступними факторами: з реалізованим кожним агентом законом керування, слабо передбачуваною поведінкою зовнішнього середовища, можливими втратами від спостереження і керування об'єктами.

Мультиагентне відображення ЛЕС дозволяє [98]:

- враховувати інтерактивний характер взаємодії різних компонентів ЛЕС;
- будувати моделі поведінки системи в умовах великого числа суб'єктів і технологічних підсистем;
- отримувати інформацію достатнього обсягу для виконання агентом свого функціонального призначення;
- надавати можливості розширення функціональності та підвищення ефективності функціонування агентів і системи МАС в цілому.

Таким чином, мультиагентне уявлення ЛЕС може бути ефективним інструментом керування потоками енергії, якістю енергопостачання та економічною ефективністю функціонування ЛЕС по відношенню до складових суб'єктів.

2.1.3 Синтез моделі МАС локальної електроенергетичної системи

На агентів можуть покладатись різні обов'язки, які вони мають виконувати в залежності від ієрархії МАС та сегменту електросистеми за який відповідає кожен агент. Наприклад, функції МАС технологічного керування на рівні координатора:

- інтелектуальна підтримка прийняття диспетчерських рішень (у формі як експертно-аналітичних повідомлень з будь-якого необхідного профілю запитів, так і рекомендацій з управління, що отримуються на основі адаптивних алгоритмів);
- оптимізація складу і кількості працюючого обладнання;
- розробка балансів електроенергії та потужності,
- короткострокове планування;
- регулювання напруги, не допускаючи її зниження і коливання, тим самим, домагаючись високого ККД багатьох видів електричних машин і пристроїв;
- контроль гармонійного складу і небалансу струмів і напруг, заходи по ліквідації джерел порушень якості електроенергії, тим самим збільшення ресурсу роботи обладнання, надійність енергопостачання;
- моніторинг поточного технічного стану з метою запобігання аварійних відключень; недопущення наднормативного завантаження на граничних режимах.

На основі вище наведеного формалізованого уявлення агента пропонується наступний набір агентів, які відображають основні суб'єкти ЛЕС. Зауважимо, що відповідний перелік агентів в таблиці не є вичерпним в загальному випадку.

В таблиці 2.1 запропоновано базовий перелік агентів МАС з точки зору їх функціонального застосування, перелік їх завдань і математичний опис.

Таблиця 2.1 - Формалізовані агенти в складі МАС ЛЕС

Агент	Функціональність	Мат. опис агента МАС
Центр керування і зв'язку ЛЕС, ЦКЗ-агент	Відповідальний за керування ЛЕС, а також відстеження та планування режимів розосереджених і відновлюваних джерел енергії	$Z_{\text{ЦКЗ}}(t) = (S_i(t)), i = 1, 2, \dots, n - 1$ $S_{\text{ЦКЗ}}(t) = (P_r, D_i^C, D_i^R)^T, i = 1, 2, \dots, n - 1$
Розподільна електромережа, що включає підстанцію, РЕМ-агент	Здійснює зовнішнє енергопостачання, а також прийом надлишків електроенергії в ЛЕС	$Z_{\text{РЕМ}}(t) = (P, D_{\text{РЕМ}}^C, D_{\text{РЕМ}}^R)^T$ $S_{\text{РЕМ}}(t) = (P, Pr_{\text{РЕМ}})^T$
Розподілені генератори, DER -агент	Відстежує, керує згенерованою потужністю відповідного генератора або групи генераторів, вартості і ціні та отримує від нього запити	$Z_{\text{DER}}(t) = (p^{\min}, p^{\max}, F_u, D_{\text{DER}}^C, D_{\text{DER}}^R)^T$ $S_{\text{DER}}(t) = (P, Q, C, P_q)^T$
Відновлювані джерела енергії, ВДЕ-агент	Відстежує, керує згенерованою потужністю відповідного ВДЕ	$Z_{\text{ВДЕ}}(t) = (p^{\max}, D_{\text{ВДЕ}}^C, D_{\text{ВДЕ}}^R)^T$ $S_{\text{ВДЕ}}(t) = (P, Q, C, P_q)^T$
Накопичувачі електроенергії, ESS-агент	Відстежує і прогнозує стан накопичувачів електроенергії, керує зарядом / розрядом накопичувачів	$Z_{\text{ESS}}(t) = (E^{\min}, E^{\max}, D_{\text{ESS}}^C, D_{\text{ESS}}^R)^T$ $S_{\text{ESS}}(t) = (E)$
Попит споживача електроенергії, DR -агентів	Відстежує, регулює попит / споживання електроенергії, стану і складу навантаження	$Z_{\text{DR}}(t) = (L_C, D_{\text{DR}}^C, D_{\text{DR}}^R)^T$ $S_{\text{DR}}(t) = (P)$
База даних реального часу, БДРЧ-агент	Здійснює збір, зберігання і обмін даними	$Z_{\text{БДРЧ}}(t) = (M, D_{\text{БДРЧ}}^C, D_{\text{БДРЧ}}^R)^T$ $S_{\text{БДРЧ}}(t) = (Upd)$
Система імітаційного моделювання, SIM-агент	Здійснює моделювання і тестування пропонування змін в режимах функціонування ЛЕС	$Z_{\text{SIM}}(t) = (D_{\text{SIM}}^C, D_{\text{SIM}}^R)^T$ $S_{\text{SIM}}(t) = (Est)$

Кожен суб'єкт в ЛЕС має свої пріоритети, які можуть відрізнятися від пріоритетів інших суб'єктів [102]. Наприклад, ціна на електроенергію може бути пріоритетним критерієм для населення, а забезпечення стабільної, надійної якості енергопостачання може бути більш значущим для промислових підприємств. Метою досліджень на основі застосування МАС є пошук рішень, що забезпечують пріоритети агентів шляхом оптимізації роботи ЛЕС в реальному часі.

Позначення, використані в таблиці 2.1: P – активна потужність; Q – реактивна потужність; Pq – вектор з показників якості електроенергії; Pr – вартість продукції, що поставляється у зовнішню мережу від локальної електроенергетичної системи; P_j^{min} , P_j^{max} – відповідні мінімальні і максимальні межі активної потужності j -го розподіленого генератора; C – вектор собівартості електроенергії від різних джерел ЛЕС; Fu – вектор вартості і кількості доступного палива; E_k^{min} , E_k^{max} – відповідно мінімальний і максимальний рівень заряду k -го накопичувача енергії; E_k – фактичний накопичений заряд k -го накопичувача енергії; L_C – вектор критичних навантажень і категорійності споживачів; M – вектор технічних характеристик обчислювальних засобів; Upd – наявність / відсутність звіту про оновлення даних; Est – прогнозування стану ЛЕС на основі імітаційного моделювання.

2.2 Об'єднання активних споживачів

Активний споживач або «prosumer» - це той, хто водночас є споживачем і виробником певного товару. У енергетичному секторі він часто використовується для позначення споживачів (домогосподарств, підприємств, громад, організацій тощо), які спираються на системи гнучкої генерації для виробництва електроенергії та/або комбінування їх з системами керування енергією, накопиченням енергії та електричними транспортними засобами [59]. Технології, що обертаються навколо ідеї активного споживача, в останні десятиліття спостерігали видатний процес поліпшення і зростання. Доступність генераторних установок, які пропонують різні розміри при будь-яких більш низьких цінах, зростаючий потенціал пристроїв зберігання даних і розповсюдження пристроїв інтелектуального вимірювання, допомагають розширювати число активних споживачів по всьому світу.

Єдині генератори відновлюваних джерел енергії, якими керують споживачі, які діють індивідуально, занадто малі, щоб конкурувати на ринку, і їх пропозиція непередбачувана або невідповідна для ефективного задоволення профілю попиту. [64] Однак кращі результати можна досягти,

коли користувачі, які мають однакові цілі та мотивації, розташовані в одній області, з'єднані разом як спільнота. Ця сукупність активних споживачів електроенергії – це те, що називається електричне об'єднання активних споживачів (ОАС).

Багато недоліків і викликів зустрічаються на різних рівнях, коли йдеться про концепцію, від розробки базових положень до доцільності, щоб зробити її економічно вигідною альтернативою традиційним стратегіям. Ефективна координація інтересів кожного члена спільноти може бути важкою, і розбіжності між членами спільноти, швидше за все, виникатимуть [63]. Нижче представлені деякі популярні технології для виробництва та зберігання енергії, а також деякі можливі цілі, які має досягти об'єднання активних споживачів.

Сама концепція спільноти декількох електричних споживачів передбачає, що вони мають намір переслідувати низку спільних цілей. Оскільки ЕРС все ще перебувають у своєму ранньому стані, і оскільки відсутні правила, то не зовсім зрозуміло, якою може бути політика громади. Метою спільноти може бути, наприклад, максимізація споживання «зеленої» енергії, виробленої розосередженими генераторами, для мінімізації обміну з фідером або для оптимізації загальних витрат всієї громади [75]. Якою б не була мета, однак, існує дуже мало досліджень, які аналізують розподіл енергії між споживачами, і, схоже, не існує жодних методів, які б ідентифікували споживачів, які не діють згідно з угодою [76]. Подальше вивчення цих аспектів має вирішальне значення для розробки нових ОАС.

2.2.1 Засоби виробництва електроенергії

Революція, яку спричинили відновлювані джерела енергії, вже пройшла свою ранню стадію, і її почали сприймати серйозно майже всі. Незважаючи на те, що більшість встановлених цілей ще не досягнуто, перехід до низьковуглецевої економіки, здається, зараз менш віддалений, ніж раніше. Загальна встановлена потужність, пов'язана з відновлюваними джерелами,

досягла 2 мільйонів МВт на кінець 2016 року [61], забезпечуючи в цьому ж році 24,5% світового виробництва електроенергії [62].

Навіть якщо вони не є єдиним варіантом, відновлювані джерела енергії та екологічні генератори стали однією з перших речей, які приходять на думку, коли люди говорять про малі, розподілені генеруючі установки, а отже, про ЛЕС.

Найбільш перспективними і поширеними технологіями існуючих систем мікрогенерації є:

- фотовольтаїчні панелі;
- малі вітроустановки;
- малі когенераційні установки;
- паливні комірки;
- мікротурбіни;

Вони і деякі з їхніх характеристик будуть представлені нижче.

2.2.1.1 Фотоелектричні установки

Сонячні фотоелектричні (PV) панелі зазвичай розглядаються як обличчя «відновлюваної революції». Електрична потужність встановлених сонячних фотоелектричних установок у 2016 році була більшою, ніж будь-яка інша технологія [67] (загальна потужність перейшла 300 ГВт [65]). На сьогодні сонячні фотоелектричні системи на 70% дешевші, ніж у 2008 році [67]. У Німеччині ціни на типові системи житлових будинків на даху площею від 10 до 100 кВт / год становили близько 14000 € / кВт у 1990 році. Що стосується часу окупності енергії сонячної фотоелектричної системи, то вона сильно залежить від місця розташування: у Північній Європі вона менше 3 років, а на півдні - близько 1,5 років [68].

В тому ж числі менш популярний тип сонячних панелей, що об'єднує PV панелі з сонячним колектором, званим PV/Т колектором. Окрім переваги виробництва теплової енергії, наявність сонячного колектора знижує температуру вищевказаних фотоелектричних панелей, підвищуючи їх

електричну ефективність. Головним недоліком є їх ціна, оскільки вони є більш дорогими, ніж традиційні сонячні фотоелектричні системи.

На рис. 2.5 зображено спрощену схему приєднання PV установок та засобів акумулювання електроенергії до електроенергетичної системи.

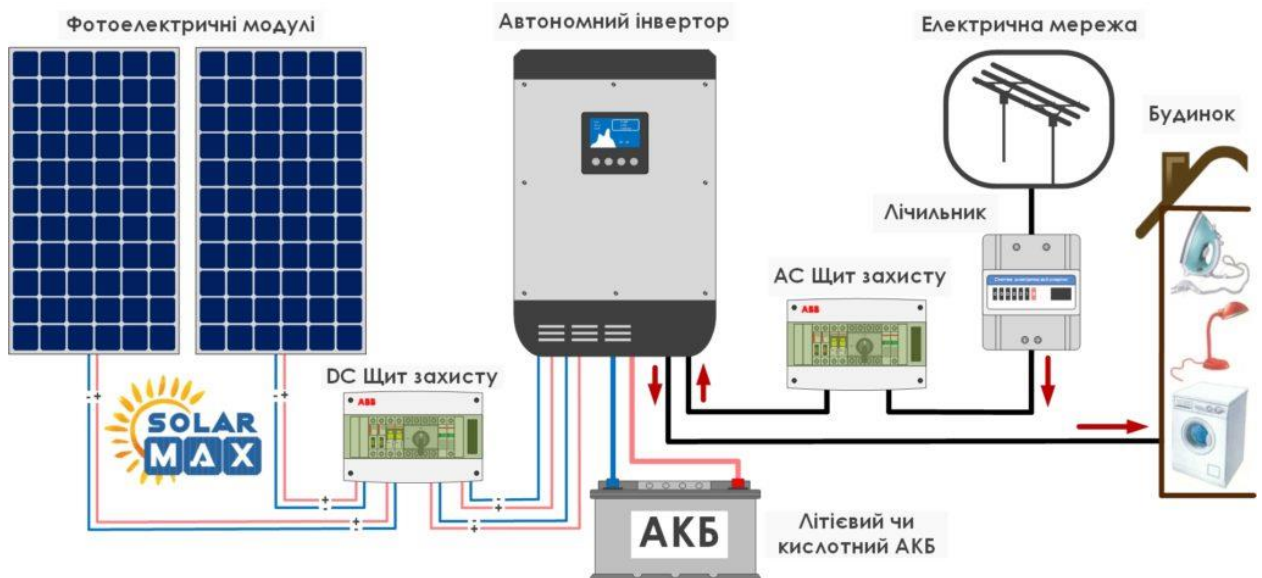


Рисунок 2.5 – Спрощена схема приєднання PV установок та засобів акумулювання електроенергії до електроенергетичної системи

2.2.1.2 Малі вітрові турбіни

Протягом останнього десятиліття інтерес до вітрових турбін продовжував значно збільшуватися в усьому світі. Конкуренція на ринку та кращі показники знизили капітальні витрати, роблячи їх конкурентною альтернативою для виробництва електроенергії, навіть у порівнянні з традиційними електростанціями. Перспективні нові конструкції характеризуються розмірами роторами значно більшими, ніж раніше, оскільки коефіцієнт потужності збільшується з розміром. Великі вітрові електростанції, як на суші, так і на березі, можуть забезпечити виняткові результати, якщо вони розміщені в потрібному місці, але їх розмір і потужність зазвичай не відповідають вимогам і ресурсам ЕРС. Потреби в житловому секторі та невеликих користувачів можуть бути вирішені за допомогою менших систем, які працюють з однаковими принципами. Ці невеликі вітрові турбіни або

мікро-вітрові турбіни, потужність яких становить близько декількох кВт, можуть допомогти задовольнити (принаймні частково) внутрішній попит, особливо якщо вони встановлені разом з іншими енергоблоками. Незважаючи на свій потенціал, малі вітрові турбіни мають багато недоліків: ефективність цих пристроїв менше, ніж у звичайних вітрових турбін, проблема виробництва шуму стає дуже актуальною в околицях, а в приміських місцях - в більшості випадків лише низька швидкість вітру з високою турбулентністю. Ці характеристики роблять малі вітрові турбіни важко прийнятними для громадської думки [69].

На рис. 2.6 зображено спрощену схему приєднання вітрової електростанції до електроенергетичної системи.

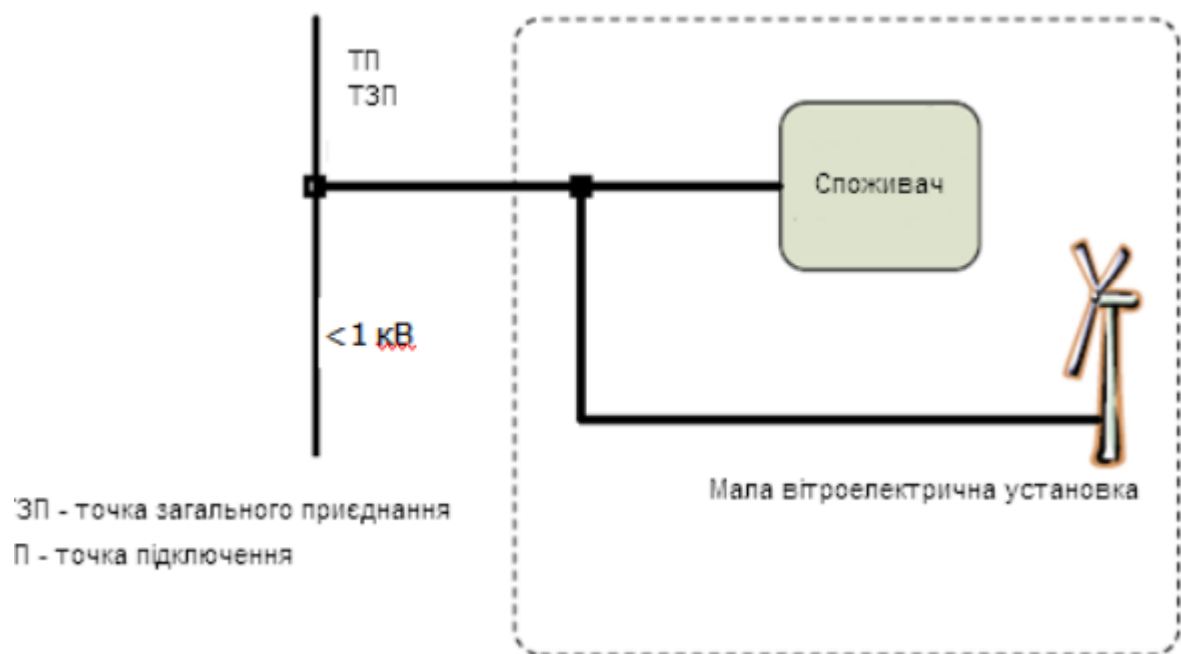


Рисунок 2.6 – Спрощена схема підключення ВЕС до електроенергетичної системи

2.2.1.3 Когенераційні установки

Когенерація - це виробництво одночасно двох форм енергії, як правило, електричної та теплової. Це стара концепція, яку можна знайти навіть на ранніх електростанціях. Останнім часом зростаючий інтерес споживачів (та

інвесторів) до стійкості надає додатковий імпульс когенерації, тому що, навіть якщо він не передбачає використання відновлюваних джерел енергії, він є дуже ефективним способом зменшення викидів вуглецю. Більше того, це дозволяє заощадити неймовірну суму грошей. Комбінована система теплової та електричної енергії також може бути розроблена на менших масштабах, що робить її привабливою для впровадження в ЕРС. Ще одна перевага когенерації полягає в тому, що вона може бути застосована з великим спектром систем (відновлюваних джерел енергії та невідновлюваних джерел енергії).

Мікротурбіни одна з технологій розосередженої генерації, які не покладаються на поновлювані джерела, є одна, яка дуже добре відповідає характеристикам ОАС. Мікротурбіни - це в основному невеликі версії турбін згоряння, які можна знайти в електростанціях. Їх вихід може переходити від 10 кВт до декількох сотень кВт [70]. Основними перевагами є допустимі витрати, хороша ефективність, легка установка та висока надійність. На ринку доступний широкий спектр моделей з різними функціями. Більшість з них живиться від паливних ресурсів, таких як природний газ або дизель, і, на відміну від фотоелектричних панелей або вітрових турбін, можна запускати, коли це необхідно.

Використання палива в мікротурбінах стає більш ефективним, коли пристрій інтегрується в систему когенерації, досягаючи ефективності до 80%. У цьому випадку тепла енергія, вироблена турбіною, не втрачається більше, але вона може бути використана для нагрівання.

На рис. 2.7 зображено принципову схему роботи когенераційної установки.

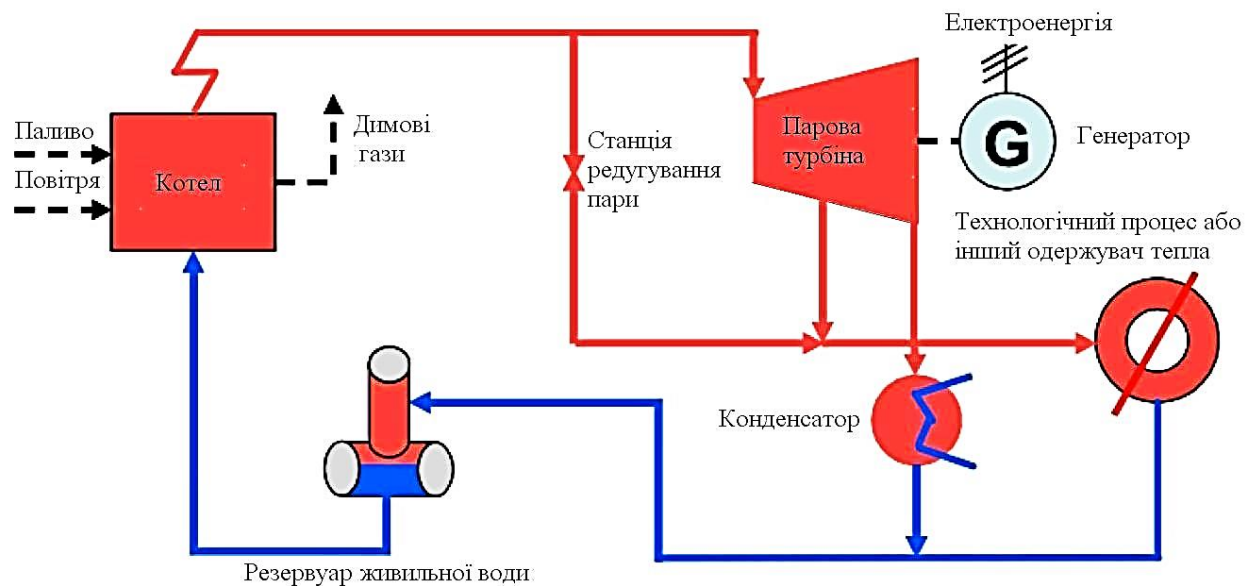


Рисунок 2.7 – Принципова схема роботи когенераційної установки

Інший варіант генерування енергії всередині ЛЕС представлений *паливними елементами*. Паливні елементи є пристроями, що перетворюють хімічну енергію палива в електричну [80] і можуть бути легко інтегровані в системи комбінованого виробництва теплової та електричної енергії. Вони зазвичай порівнюються з акумуляторними батареями, оскільки перетворення здійснюється за допомогою електрохімічних процесів, але вони відрізняються тим, що паливним елементам необхідне протікання через них палива. Існує багато різних паливних елементів, і більшість з них представляє екологічно чисту можливість генерувати енергію з гарною ефективністю. Їх ринок швидко зростає, дослідники розробляють все більше і більше технологій. Серед поточних доступних паливних елементів найбільш рекомендованими для ЛЕС є паливні елементи фосфорної кислоти (PAFC), розплавлені карбонатні паливні елементи (MCFC) і тверді оксидні паливні елементи (SOFC) [58].

2.2.1.4 Інші технології виробництва електроенергії

Те, що було представлено в цьому розділі, є лише незначною частиною наявних технологій для розосередженої генерації (РГ). Багато інших способів, які використовуються для виробництва електричної енергії на великих

електростанціях, можуть застосовуватися також на менших масштабах. У деяких випадках можливими є альтернативи, такі як малі гідроелектростанції, геотермальна енергія або ресурси біомаси. Кожен з них характеризується перевагами і недоліками, і неможливо підтвердити, який з них найкращий, оскільки залежить від незліченних параметрів. Хороша пропозиція про те, як виробляти енергію в громаді, полягає в тому, щоб покладатися на більш ніж одну технологію: гібридні системи є хорошим методом, щоб компенсувати недоліки однієї технології з перевагами іншої, підвищуючи надійність генерації.

2.2.2 Системи акумуляції електроенергії

Відновлювані розосереджені генератори не є досконалими. Багато недоліків, які часто приписуються цим технологіям, це, наприклад, невисока надійність, обмежена якість електроенергії і труднощі в прогнозуванні і організації виробництва. Доцільною, що допомагає запобігти цим проблемам, є інтеграція в мережу ефективних систем зберігання енергії (Energy Storage Systems). Крім переваг, які вони надають розосередженим генераторам, вони, однак, є потужним інструментом для розумного керування енергією. ESS можна класифікувати за формою енергії, яку вони мають: електрохімічні, термічні, хімічні, електричні або механічні пристрої.

Електрохімічні батареї – це те, що зазвичай асоціюється з концепцією запасу енергії, завдяки їхній присутності в багатьох загальних застосуваннях. Батареї зберігають енергію в електрохімічній формі і мають своє походження на початку 19 століття. З тих пір з'явилися незліченні технології, що збільшили потужність, щільність, термін служби і т.д. Останні десятиліття побачили нові помітні поліпшення, зменшення вартості батареї і збільшення придатності для житлового використання [71] [80].

Незважаючи на те, що батареї користуються великою популярністю, 96% електричної ємності, що встановлюється у світі, представлена іншою системою: малі ГАЕС [80]. ГАЕС використовує гравітаційну енергію водоймища, що знаходиться на певній висоті. Коли потрібна електрична

потреба, вода надходить у нижній резервуар, протікаючи через турбіну, що виробляє електроенергію.

Багато інших технологій доступні для ESS, такі як акумулювання енергії стисненого повітря, маховики і суперконденсатори, але вони все ще підходять тільки для конкретних застосувань. Коротка характеристика деяких технологій зберігання енергії представлена в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Технології акумуляції електроенергії.

Тип	Щільність енергії Вт*год/кг	Щільність потужності, Вт/кг	Час реагування	Кількість циклів
Маховик	5-30	400-1500	1 сек	20000
Стиснене повітря	30-60	-	1-10 хв	100000
Свинцево-кислотні батареї	30-50	75-300	10 сек	2000
Літій-іонні	75-200	150-300	10 сек	10000
Натрій-сірчані	100-250	100-230	10 сек	2500-6000
Суперконденсатор	5-10	5-10	1 сек	100000

Електричні транспортні засоби є ще одним елементом, окрім відновлюваних джерел енергії, який сприяє переходу до більш екологічного середовища та побудови більш стійкого майбутнього: Електричні транспортні засоби (EV). Електромобілі можуть бути потужним інструментом електричної мережі, що споживає або зберігає електроенергію на вимогу, коли під'єднаний до мережі: ця концепція має назву Vehicle-to-Grid (V2G) [72]. Електромобілі, мають хороший економічний потенціал як допоміжну службу для енергосистеми [73], але також можуть бути використані окремі транспортні засоби, якщо вони використовуються як пристрої зберігання в ЕРС. Їх впровадження в мікросередовище є більш складним, ніж звичайний акумулятор, але вони все ще можуть забезпечити цікаві можливості та додаткову потужність [74].

2.2.3 Керування попитом на енергоресурси

Найчистішою енергією є та, яку ви не використовуєте, всі ми її знаємо. Одним з ключових моментів ОАС є спроба задовольнити внутрішній попит активних споживачів ефективним способом. Це нелегке завдання, оскільки прогнозування майбутнього попиту і виробництва надзвичайно важко, а в деяких випадках і неможливо. Проте, коли більше споживачів об'єднуються в одній громаді, можна було б координувати і організовувати деякі завдання з енерговитрат, щоб зменшити загальне споживання, піковий попит і витрати. Такий підхід називається "керуванням попитом" або "Demand Management".

Висновки:

1. В даному розділі розглянуто основні характеристики МАС систем керування, наведено переваги використання їх в енергетичній галузі. Запропоновано базовий перелік агентів МАС ЛЕС, наведено їх функціональні обов'язки та математичні описи кожного агента, що дозволяє застосувати МАС в ЛЕС з врахуванням особливостей кожного об'єкту електроенергетичної системи.

2. Запропонована формалізація рішення задач керування і оцінки ефективності функціонування ЛЕС на основі мультиагентної системи дозволила звести рішення технологічних завдань до дослідження узагальненої математичної моделі ЛЕС з вбудованою ІНС. Це дає можливість зв'язати важливі параметри реального стану ЛЕС з чисельними характеристиками критеріїв оптимальності її функціонування - технічними, економічними, екологічними.

3. Розглянуто особливості роботи активних споживачів, наведено їх характеристику з точки зору можливостей до генерації, накопичення енергії та керування власним попитом на електроенергії. Наведено поняття об'єднання активних споживачів та наведено структуру ЛЕС з активним споживачем, що дозволяє оцінювати загальний вплив двох та більше активних споживачів всередині ЛЕС.

3 МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ КЕРУВАННЯ ЛОКАЛЬНИМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИМИ СИСТЕМАМИ З АКТИВНИМ СПОЖИВАЧЕМ

3.1 Методи керування активним споживачем

3.1.1 Формалізація спільноти-споживача

Перш ніж розглядати проблеми контролю, краще спробувати формалізувати спрощену модель динаміки об'єднання активних споживачів для використання в розробці децентралізованої схеми керування. Розглянемо низьковольтну розподільчу мережу, складену з $N \in \mathbb{N}$ шин, де одна шина є кореневим зв'язком, точкою зв'язку між ЛЕС та енергосистемою, тоді як інші $N - 1$ шини є житлом $N_{pro} \in \mathbb{N}$ всередині ЛЕС. Число гілок в мережі $L \in \mathbb{N}$, причому R_l і X_l , відповідно, опір і реактивність l -ої гілки ($l \in \{1 \dots L\}$). Для простоти розглянемо лінійну мережу, подібну до тієї, що на Рис.3.1, з батареями і сонячними фотоелектричними панелями, встановленими на кожній шині.

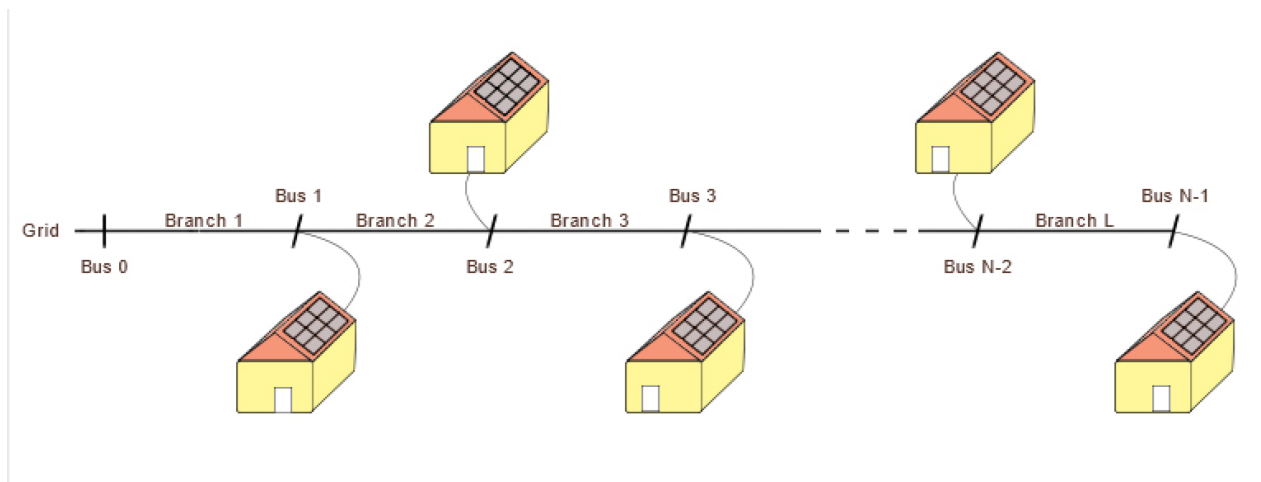


Рисунок 3.1 – Спрощене відображення електричного об'єднання активних споживачів

Як зазначалося раніше, кожен активний споживач всередині об'єднання може споживати, виробляти або зберігати електроенергію. Таким чином, ми

можемо асоціювати генеруючу потужність $X_{pr,i}$, ємність зберігання $X_{batt,i}$, ефективність зарядки зберігання $\eta_{ch,i}$ та ефективність вивантаження $\eta_{dis,i}$ для кожної шини $i \in \{1, \dots, N - 1\}$.

Розглянемо поведінку об'єднання над множиною дискретних проміжків часу $t \in \{1, \dots, T\}$ з $T \in \mathbb{N}$ як часовий горизонт. Зверніть увагу, що всі величини вважаються за одиницю, і всі змінні, пов'язані з енергією, приймають середнє значення за інтервал часу між двома проміжками часу. На кожному проміжку часу $t \in \{1, \dots, T\}$ активний споживач $i \in \{1, \dots, N - 1\}$ споживає активну потужність $P_{load,i}^t$ і реактивну потужність $Q_{load,i}^t$. Споживання навантаженням залежить від електричних приладів, що знаходяться і використовуються в приміщенні, а в тексті цієї роботи ми вважаємо, що вона не може бути модульована системою керування. Активним споживачем безпосередньо контролюється виробництво електроенергії (активної $P_{pr,i}^t$ та реактивної $Q_{pr,i}^t$) та потужність, що обмінюється з батареями (зберігається $P_{ch,i}^t$ або виводиться $P_{dis,i}^t$). Згенерована потужність обмежена максимальним потенціалом, який дає технологія та погодні умови:

$$P_{pr,i}^t \leq P_{pr,i}^{t,max}, \quad (3.1)$$

$$|Q_{pr,i}^t| \leq Q_{pr,i}^{t,max}. \quad (3.2)$$

Акумулятор на шині i характеризується на кожному кроці часу за рахунок енергії, що зберігається S_i^t . Дві змінні, пов'язані з потужністю, що обмінюється з батареями, $P_{ch,i}^t$ (зарядка батареї) і $P_{dis,i}^t$ (розрядка батареї), завжди є позитивними. Чиста потужність, що обмінюється з пристроєм, не може перевищувати межі, які в основному залежать від пристрою зберігання і не може призвести до того, що стан заряду батареї перейде до значень менших 0 або вище 1. Динаміка батареї описується в наступних рівняннях:

$$P_{ch,i}^t - P_{dis,i}^t \leq P_{batt,t}^{t,max}; \quad (3.3)$$

$$0 \leq S_{batt,i}^t + \eta_{ch,i} P_{ch,i}^t \Delta t - \frac{P_{dis,i}^t}{\eta_{dis,i}} \Delta t \leq X_{batt,i}. \quad (3.4)$$

Позначимо через $P_{\delta,i}^t$ і $Q_{\delta,i}^t$ – i -ту потужність, що вводиться в розподільчу мережу від активного споживача i -ий в інтервал часу t .

$$P_{\delta,i}^t = P_{pr,i}^t + P_{dis,i}^t - P_{ch,i}^t - P_{load,i}^t; \quad (3.5)$$

$$Q_{\delta,i}^t = Q_{pr,i}^t - Q_{load,i}^t. \quad (3.6)$$

Коли ці змінні відрізняються від нуля, це означає, що активний споживач i має надлишок (якщо $P_{\delta,i}^t > 0$) або дефіцит потужності (якщо $P_{\delta,i}^t < 0$). У цих випадках вона повинна бути збалансована надлишком/дефіцитом іншого споживача в межах об'єднання або фідером. Контроль виробництва електроенергії та використання батарей є важливим елементом для зменшення перенапруги, перевантажень ліній, втрат мережі та витрат. Говорячи про витрати та доходи, ми припускаємо, що обмін електроенергією між споживачами не пов'язаний з будь-якими витратами (їх ціна дорівнює нулю), тоді як енергія, яку обмінюють споживачі з електропостачальною організацією в момент часу t , характеризується ціною c_{el}^t .

3.1.2 Децентралізована схема керування

Як і інші системи, що складаються з декількох агентів, існують дві основні стратегії керування для ЕРС, централізований і ієрархічний механізм або розподілена схема. Централізована схема керування свідчить про те, що всі отримані дані зібрані разом і відправлені до центрального органу, який обчислює замовлення і координує дії активних споживачів. Для досягнення хороших результатів дана система повинна мати детальну модель мережі, ефективні пристрої зв'язку та обладнання, необхідне для отримання, зберігання та обробки інформації. Останній називається "Microgrid Central Controller" (MGCC) і відіграє важливу роль у структурі керування. Головним недоліком побудови та підтримки всіх механізмів, залучених до

централізованої стратегії, є те, що вона може бути дуже дорогою. Крім того, оскільки сучасні технології інтелектуальних лічильників з'явилися на ринку, питання конфіденційності для одного активного споживача зростає через обмін інформацією про особисте споживання з іншими людьми [63]. Ми досі не знаємо, як майбутнє регулювання розглядатиме це питання як тільки показник активних споживачів зростає, тому може бути цікаво дослідити можливі моделі децентралізованих схем контролю, які не вимагають від особи поширення занадто великих обсягів інформації.

Під "децентралізованою схемою керування" ми маємо на увазі, що кожен окремий споживач у ЕРС приймає автономні рішення щодо взаємодії з рештою мережі. Ми хочемо дослідити, як проектувати розподілені схеми контролю, які можуть сприяти досягненню (принаймні частково) цілей спільноти. Для уникнення поширення активними споживачами конфіденційної інформації, ми припускаємо, що вони приймають свої рішення лише на основі місцевих вимірів. Це нелегке завдання, оскільки часткові дані про стан мережевої ускладнює обчислення економічно ефективних рішень. Не тільки важко максимізувати доходи, але неналежні дії можуть викликати перенапруження, падіння напруги або перевантаження всередині мережі, що підриває безпеку ЛЕС. Запропонована стратегія полягає в тому, щоб вдатися до методик навчання, які можуть бути вилучені з централізованих, оптимальних рішень, шаблонів прийняття рішень, які будуть застосовуватися на рівні єдиного активного споживача.

3.1.3 Алгоритм «Контрольованого навчання»

«Контрольоване навчання» (Supervised learning) – один із способів машинного навчання, в ході якого випробувана система примусово навчається за допомогою прикладів «стимул-реакція». З точки зору кібернетики, є одним з видів кібернетичного експерименту. Між входами і еталонними виходами (стимул-реакція) може існувати деяка залежність, але вона невідома. Відома тільки кінцева сукупність прецедентів - пар «стимул-реакція», що носить назву навчальної вибірки. На основі цих даних потрібно відновити залежність

(побудувати модель відносин стимул-реакція, придатних для прогнозування), тобто побудувати алгоритм, здатний для будь-якого об'єкта видати досить точну відповідь. Для вимірювання точності відповідей, так само як і в навчанні на прикладах, може вводиться функціонал якості.

Методи «Контрольованого навчання» (КН) мають свої корені в світі статистики. Їхня головна мета полягає в тому, щоб передбачити, який вихід Ψ сукупності вхідних даних ψ , аналізуючи характер навчальних даних [85]. Методи (КН) використовуються в багатьох задачах і областях. Якщо вихідні дані є певним типом міток, ми називаємо це *задачею класифікації*, інакше, якщо вихідні складаються з безперервних змінних, це *задача регресії*. Кожна задача, пов'язана з контрольованим навчанням, включає, зокрема, навчальний процес, який виконується з використанням набору даних вибірок, що містить набір входів і їх відповідні виходи. Алгоритм КН досліджує ці дані, намагається дізнатися з них і створити функцію оцінки, щоб знайти вихідні дані, пов'язаний з новими вхідними даними.

Література наповнена методами і алгоритмом КН для застосування до декількох задач. Однією з популярних технік методів КН є один з деревовидних методів, який є простий у застосуванні та придатний як для класифікації, так і для регресійних задач [85]. Модель, що використовується в розробці децентралізованої стратегії керування, є деревовидним методом, який називається Extremely Randomized Trees – ансамблевий метод машинного навчання для класифікації, регресії та інших завдань, які оперують за допомогою побудови численних дерев прийняття рішень під час тренування моделі і продукують моду для класів (класифікацій) або усереднений прогноз (регресія) побудованих дерев. Недоліком даного методу є схильність до перенавчання.

3.1.3.1 Статистичні оцінювачі

Для того, щоб спробувати спрогнозувати оптимальну стратегію активного споживача, ми підготували чотири різні статистичні оцінювачі. Цими оцінювачами є R_P , R_Q , R_C та R_D , і вони пов'язані з, відповідно,

оптимальним рівнем виробництва активної потужності, виробництвом реактивної потужності, потужністю зарядки пристрою акумуляції і потужністю розрядки пристрою акумуляції. Кожен статистична оцінювач побудований таким чином, щоб прийняти за вхідні дані тільки набір інформації, що пов'язаний тільки з конкретним активним споживачем i в періоді часу t .

Процедура навчання

Підготовка статистичних оцінювачів у задачі з КН здійснюється переходом до моделі набору даних, що містять кілька зразків оптимальних (вхідних, вихідних) пар. Статистичні оцінювачі, спостерігаючи за цими даними, формують з них стратегію прогнозування, яка повинна бути правильним виходом для асоціації з певним входом. Для формування моделей прийняття рішень, які будуть застосовуватися локально активними споживачами, чотири оцінки R_P , R_Q , R_C та R_D навчаються з використанням рішення задач оптимального потоку потужності, вирішених централізованою схемою керування, встановленої в тій самій мережі, в якій мають застосовуватися статистичні оцінювачі. Існує декілька методів для вирішення таких задач, один з них, пристосований для нашого випадку, описаний нижче. Цей централізований контролер має ідеальне знання задачі, і таким чином він може виявити рішення, які оптимізують глобальну ціль ЕРС.

Вирішення однієї з таких задач виводить часові ряди даних, що відповідають зміні всіх показників за часовий діапазон:

$$[\Xi_0^*, \dots, \Xi_{T-1}^*]; \quad (3.7)$$

З цього часового діапазону даних можна відібрати ряд локальних даних, тобто відносно одного активного споживача (i):

$$[\Xi_1^{(i),*}, \dots, \Xi_T^{(i),*}]; \quad (3.8)$$

де $\forall t \in \{1, \dots, T\}$, $\forall i \in \{1, \dots, N-1\}$,

$$\Xi_i^{t,*} = \begin{pmatrix} P_{pr,i}^t & Q_{pr,i}^t \\ P_{pr,i}^{max,t} & Q_{pr,i}^{max,t} \\ P_{Load,i}^t & Q_{Load,i}^t \\ P_{ch,i}^t & P_{dis,i}^t \\ S_{batt,i}^t & c_{el}^t \\ |\underline{u}_i^t| & arg(\underline{u}_i^t) \end{pmatrix}. \quad (3.9)$$

З цих вибірок ми генеруємо наступні навчальні набори:

1. Для формування навчального набору, присвяченого вивченню того, як оптимізувати рівень виробництва активної електроенергії енергії, ми обробляємо всі змінні $\Xi_i^{t,*}$ в наступний набір пар (вхідних, вихідних):

$$\mathcal{L}^P = \{(\psi_{p,i}^t, \Psi_{p,i}^t)\}_{i=1, t=1}^{i=N-1, t=T}; \quad (3.10)$$

де $\forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall i \in \{1, \dots, N-1\}$,

$$\psi_{p,i}^t = (i, t, c_{el}^t, |\underline{u}_i^t|, arg(\underline{u}_i^t), P_{Load,i}^t, Q_{Load,i}^t, P_{pr,i}^{max,t}, Q_{pr,i}^{max,t}, S_{batt,i}^t); \quad (3.11)$$

$$\Psi_{p,i}^t = P_{pr,i}^t; \quad (3.12)$$

де:

- i : кількість шин в системі;
- t : крок часу;
- $|\underline{u}_i^t|$: амплітуда напруги на шині i в проміжку часу t ;
- $arg(\underline{u}_i^t)$: кут напруги на шині i в проміжку часу t ;
- c_{el}^t : ціна на електроенергію в проміжку часу t ;
- $S_{batt,i}^t$: рівень заряду батареї на шині i в проміжку часу t ;
- $P_{Load,i}^t, Q_{Load,i}^t$: споживання активної та реактивної потужності на шині i в проміжку часу t ;

- $P_{pr,i}^{max,t}, Q_{pr,i}^{max,t}$: максимальний потенціал виробництва активної та реактивної потужності на шині i в проміжку часу t ;
- 2. Для створення навчального набору, присвяченого вивченню того, як оптимізувати рівень виробництва реактивної потужності, ми обробляємо всі змінні $\Xi_i^{t,*}$ в наступний набір пар (вхідних, вихідних):

$$\mathcal{L}^Q = \{(\psi_{Q,i}^t, \Psi_{Q,i}^t)\}_{i=1, t=1}^{i=N-1, t=T}; \quad (3.13)$$

де $\forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall i \in \{1, \dots, N-1\}$,

$$\begin{aligned} \psi_{Q,i}^t &= \psi_{P,i}^t; \\ \Psi_{Q,i}^t &= Q_{pr,i}^t. \end{aligned}$$

- 3. Для формування навчального набору, присвяченого вивченню того, як оптимізувати рівень потужності, що вводиться в батарею, ми обробляємо всі змінні $\Xi_i^{t,*}$ в наступний набір пар (вхідних, вихідних):

$$\mathcal{L}^C = \{(\psi_{C,i}^t, \Psi_{C,i}^t)\}_{i=1, t=1}^{i=N-1, t=T}; \quad (3.14)$$

де $\forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall i \in \{1, \dots, N-1\}$,

$$\begin{aligned} \psi_{C,i}^t &= \psi_{P,i}^t; \\ \Psi_{C,i}^t &= P_{ch,i}^{t,*}. \end{aligned}$$

- 4. Для формування навчального набору, присвяченого вивченню того, як оптимізувати рівень потужності, що виводиться з батареї, ми обробляємо цілі змінні $\Xi_i^{t,*}$ в наступні множини i (вхідних, вихідних) пар:

$$\mathcal{L}^D = \{(\psi_{D,i}^t, \Psi_{D,i}^t)\}_{i=1, t=1}^{i=N-1, t=T}; \quad (3.15)$$

де $\forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall i \in \{1, \dots, N-1\}$,

$$\begin{aligned} \psi_{D,i}^t &= \psi_{P,i}^t; \\ \Psi_{D,i}^t &= P_{dis,i}^{t,*}. \end{aligned}$$

Навчальні набори повинні бути отримані з сценаріїв, подібних до тих, з якими може працювати реальна мережа, і вони повинні містити велику кількість (вхідних, вихідних) пар. Набір мережевих даних, включених у вхідні дані $\psi_{P,i}^t, \psi_{Q,i}^t, \psi_{C,i}^t, \psi_{D,i}^t$ статистичних оцінок R_P, R_Q, R_C і R_D , може відрізнятись від представленого вище. Дані, такі як напруга або виробництво електроенергії на шинах сусідів, були знехтувані, щоб уникнути проблем з конфіденційністю. Інформація, така як періоду року (що міститься у величині t) або фаза напруги, може здатися, замість цього, марною, але попередні випробування показали, що вони можуть допомогти покращенню якості прогнозів.

3.1.3.2 Перевірка достовірності прогнозованих даних

Як тільки статистичні оцінки пройшли навчання, вони можуть бути використані, щоб спробувати передбачити рішення одного активного, коли він динамічно взаємодіє з іншими активними споживачами та енергопостачальниками. Ідея полягає в тому, щоб передати статистичним оцінкам R_P, R_Q, R_C і R_D локальні вимірювання, що відносяться до активного споживача i (такого ж типу входів, що використовуються для їх навчання), і використовувати їхні прогнози для керування вибором цього активного споживача. Оскільки немає ніяких обмежень для значень результатів, їх передбачення може призвести до нездійснених або небезпечних дій (тобто статистична оцінка припускає, що виробництво електроенергії більше, ніж

потенційне, або потужність, що вводиться в сховище, що призведе до того, що заряд батареї вийде за межі максимального значення). Тому для зміни значення необхідно проводити часткову перевірку вихідних даних. Позначимо через $R_{i,t}^{P*}$, $R_{i,t}^{Q*}$, $R_{i,t}^{C*}$ і $R_{i,t}^{D*}$ попередні прогнози, зроблені статистичними оцінками, пов'язаними з входом шини i та періодом часу t .

Важливо відзначити, що навіть після проведеної обробки вихідних значень, існує ризик виникнення перенапруги.

Фактичні дії на тій же шині та тому ж періоді часу виправляються до $P_{pr,i}^t$, $Q_{pr,i}^t$, $P_{ch,i}^t$ і $P_{dis,i}^t$ таким чином:

1. Для рівня виробництва активної потужності:

$$\begin{aligned} &\text{if } \mathcal{R}_{i,t}^{P*} \geq P_{pr,i}^{max,t} \\ &\quad P_{pr,i}^t = P_{pr,i}^{max,t} \\ &\text{else if } \mathcal{L}^P(in^{i,t}) \leq P_{pr,i}^{min,t} \\ &\quad P_{pr,i}^t = P_{pr,i}^{min,t} \\ &\text{else } P_{pr,i}^t = \mathcal{R}_{i,t}^{P*} \end{aligned}$$

2. Для рівня виробництва реактивної потужності:

$$\begin{aligned} &\text{if } \mathcal{R}_{i,t}^{Q*} \geq Q_{pr,i}^{max,t} \\ &\quad Q_{pr,i}^t = Q_{pr,i}^{max,t} \\ &\text{else if } \mathcal{L}^Q(in^{i,t}) \leq Q_{pr,i}^{min,t} \\ &\quad Q_{pr,i}^t = Q_{pr,i}^{min,t} \\ &\text{else } Q_{pr,i}^t = \mathcal{R}_{i,t}^{Q*} \end{aligned}$$

3. Для потужності, що вводиться в батарею:

$$\begin{aligned}
&\text{if } \mathcal{R}_{i,t}^{C*} \geq P_{batt,i}^{max} \\
&\quad P_{c,i}^t = P_{pr,i}^{max,t} \\
&\text{else if } \mathcal{R}_{i,t}^{C*} \leq 0 \\
&\quad P_{ch,i}^t = 0 \\
&\text{else } P_{ch,i}^t = \mathcal{R}_{i,t}^{C*} \\
&\text{if } S_i^t + P_{ch,i}^t \eta_{ch,i} \geq X_{batt,i} \\
&\quad P_{ch,i}^t = \frac{X_{batt,i} - S_i^t}{\eta_{ch,i}}
\end{aligned}$$

4. Для потужності, що виводиться з батареї:

$$\begin{aligned}
&\text{if } \mathcal{R}_{i,t}^{D*} \geq P_{batt,i}^{max} \\
&\quad P_{dis,i}^t = P_{pr,i}^{max,t} \\
&\text{else if } \mathcal{R}_{i,t}^{D*} \leq 0 \\
&\quad P_{dis,i}^t = 0 \\
&\text{else } P_{dis,i}^t = \mathcal{R}_{i,t}^{D*} \\
&\text{if } S_i^t - \frac{P_{dis,i}^t}{\eta_{dis,i}} < 0 \\
&\quad P_{dis,i}^t = S_i^t \eta_{dis,i}
\end{aligned}$$

3.2 Аналіз потоку потужності змінного струму

Дослідження та функціонування будь-якої взаємопов'язаної електроенергетичної системи вимагають проведення чисельного аналізу для визначення стану мережі, починаючи з відомих параметрів – дане обчислення називається *аналізом потоку потужності* або *дослідженням потоку навантаження*. Аналіз потоку потужності дозволяє обчислити струми, активну та реактивну потужність, що протікає в гілках, втрати, напруги на шинах. Він використовується не тільки для аналізу роботи вже існуючих мереж, але і є потужним методом для пошуку конфігурацій, що призводять до критичних умов, або розробки нових енергосистем. Крім того, він може бути включений в інші способи вирішення завдань ЛЕС, економічної диспетчеризації або для визначення *оптимального потоку потужності*,

найбільш ефективної конфігурації системи. У цій главі представлено основну формулювання задачі та спосіб її вирішення при застосуванні до ЛЕС.

Визначення та розв'язання рівнянь потоків потужності енергосистеми є основними завданнями при дослідженні навантаження. Даними, необхідними для їх виконання, є матриця вузлових провідностей Y_{BUS} . У системі з N шин Y_{BUS} є матрицею $N \times N$ такою, що:

$$UY_{BUS} = I. \quad (3.16)$$

Рівняння (3.16) відображає матричну форму закону Ома.

Існують чотири різні змінні, пов'язані з кожною шиною $i \in \{0, \dots, N - 1\}$: споживана активна потужність P_i , споживана реактивна потужність Q_i , величина напруги U_i і фаза напруги ϕ_i . Залежно від типу шини i , змінні, які передбачаються відомими:

- якщо шина i є слабкою шиною, то величина напруги U_i і фаза ϕ_i ;
- якщо шина i є шиною з PV установкою, то величина напруги U_i і активна потужність P_i ;
- якщо шина i є P-Q шиною, активна потужність P_i і інжекції реактивної потужності Q_i .

Метою аналізу є оцінка решти:

- $N_{P-V} + N_{P-Q}$ фази напруги;
- N_{P-Q} амплітуди напруги.

Таким чином, загальна кількість невідомих є $N_{P-V} + 2N_{P-Q}$.

Для кожної шини $i \in \{0, \dots, N - 1\}$ можна записати наступні рівняння енергетичного балансу:

$$P_i = \sum_{j=0}^{N-1} U_i U_j \left(G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) \right); \quad (3.17)$$

$$Q_i = \sum_{j=0}^{N-1} U_i U_j \left(G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) \right); \quad (3.18)$$

де: G_{ij} – реальна частина елемента, що відповідає i -му рядку і j -му стовпцю в Y_{BUS} ; B_{ij} – уявна частина елемента, що відповідає i -му рядку і j -му стовпцю в Y_{BUS} .

Тому ми маємо набір рівнянь, які можна використовувати для пошуку невідомих змінних. Як тільки знайдені значення цих змінних, оцінка решти необхідних параметрів (струму в вітках, втрати потужності тощо) стає тривіальною задачею, використовуючи наступне теоретичне співвідношення:

$$I_i = \left(\frac{P_i + jQ_i}{U_i} \right)^* . \quad (3.19)$$

3.2.1 Оптимізація потоку потужності в ЛЕС

Дослідження потоку потужності може бути реалізовано в задачі оптимізації для пошуку найбільш ефективного способу керування енергосистемою при дотриманні меж роботи мережі та інших обмежень. Ця задача зазвичай називається задачею оптимального потоку потужності (ОПП) або «Optimal Power Flow». Набір рівнянь, описаний у розділі 4.1, включає нелінійні відношення. Результируюча оптимізаційна задача є нелінійною і невивпуклою при збільшенні експоненціально обчислювальних витрат, необхідних для вирішення задачі ОПП, особливо з великими взаємопов'язаними енергосистемами. Існує багато способів її вирішення, і розроблено декілька підходів для зменшення складності задачі [81, 82].

Цікавий метод з хорошими властивостями збіжності, який добре збігається з мережами низької напруги, розроблений Філіпом Фортенбахером та ін. [83]. У даній роботі автори перетворюють нелінійні рівняння потоку потужності в лінійну задачу, спираючись на припущення, які є загальними для більшості мереж низької напруги. Ця лінійна задача ітераційно вирішується, оновлюючи кожного разу напруги на шинах за допомогою комбінованої техніки прямої та зворотної розгортки (ПЗР) або «forward backward sweep» (FBS) [84]. Цей метод називається «Пряма та зворотня розгортка –

оптимального потоку потужності» (ПЗР-ОПП), і він буде використовуватися в контексті цієї роботи для представлення централізованої стратегії керування та створення навчальних наборів, що використовуються моделлю КН представлені в розділі 2.3.

3.2.2 Алгоритм ПЗР-ОПП

Розглянемо низьковольтну розподільчу мережу з слабко зв'язаною радіальною структурою, подібною до тієї, що формалізувалася в попередньому розділі, складеної з $N \in \mathbb{N}$ шин, де перша шина є точкою загального зв'язку між центральною мережею сіткою і ЛЕС, тоді як інші $N - 1$ шини є будинками $N_{pro} \in \mathbb{N}$ є будинками активних споживачів, що входять до ЕРС. Кожне наступне співвідношення записане для загального періоду часу t і є дійсним при $\forall t \in \{1, \dots, T\}$ з T як часовий діапазон задачі. Топологія мережі відображається інжекцією шини до матриці струму розгалуження $\mathbf{M}_f \in \mathbb{R}^{L \times N}$, визначеної в [84]. Вона пов'язує вектор $\underline{i}^t \in \mathbb{R}^{N \times 1}$ струму шини до вектора $\underline{i}_b^t \in \mathbb{R}^{L \times 1}$ струмів гілки через закони Кірхгофа.

$$\underline{i}_b^t = \mathbf{M}_f \underline{i}^t. \quad (3.20)$$

Наприклад, якщо розглядати наступну просту мережу, що показана на рис. 3.2:

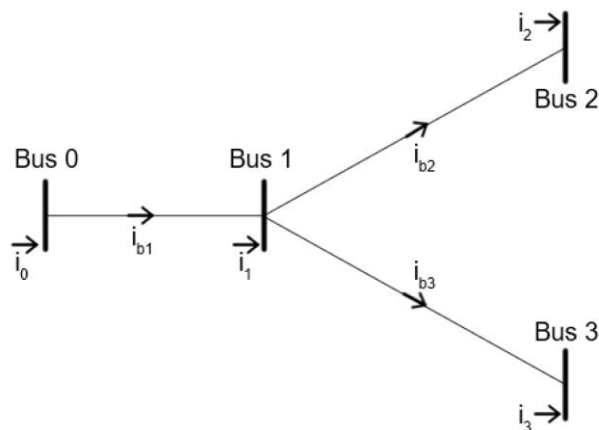


Рисунок 3.2 – Спрощена схема електромережі

Ми можемо написати:

$$i_{b1} = i_1 + i_2 + i_3;$$

$$i_{b2} = i_2;$$

$$i_{b3} = i_3.$$

Виходячи з рівняння 4.5 отримаємо, що M_f дорівнює:

$$\mathbf{M}_f = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

Формулювання ПЗР-ОПП вимагає також введення іншої матриці, позначеної як $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{L \times N-L}$, яка виходить з видалення першого ряду від \mathbf{M}_f . Щоб перетворити традиційну OPF на лінійну задачу, нам необхідно тепер зробити деякі наближення щодо напруги, струмів і втрат.

3.2.2.1 Апроксимація напруги

Якщо розглядати загальну гілку $l \in \{1 \dots L\}$ ми можемо записати, згідно Закону Ома, що падіння напруги в лінії:

$$\Delta \underline{u}_l^t = [R_{dl} + jX_{dl}] \underline{i}_{bl}^t; \quad (3.21)$$

Поєднавши рівняння 4.4 і 4.6 ми можемо записати у матричній формі:

$$\Delta \underline{u}^t = \mathbf{M}^T [\mathbf{R}_d + j\mathbf{X}_d] \mathbf{M}_f \underline{U}_{df}^t [\mathbf{P}_{gen}^t + j\mathbf{Q}_{gen}^t]^*; \quad (3.22)$$

де:

- $\mathbf{R}_d = diag\{R_{d1} \dots R_{dL}\} \in \mathbb{R}^{L \times L}$ - матриця активного опору;
- $\mathbf{X}_d = diag\{X_{d1} \dots X_{dL}\} \in \mathbb{R}^{L \times L}$ - матриця реактивного опору;
- $\underline{U}_{df}^t = diag\left\{\frac{1}{\underline{u}_0^t} \dots \frac{1}{\underline{u}_N^t}\right\} \in \mathbb{R}^{N \times N}$ - матриця вузлової лінії до нейтральної напруги.

Рівняння (4.7) представляє складний взаємозв'язок. Щоб лінеаризувати його, автори статті [33], вирішили припустити, що вузлові кути напруги малі, а опори в мережі набагато більші, ніж його реактивні характеристики. Такі припущення зазвичай стосуються мереж НН. Ми можемо тоді наблизити (4.1) як:

$$\mathbf{u}^t \approx \mathbf{u}_s + \begin{bmatrix} \mathbf{M}^T \mathbf{R}_d \mathbf{M}_f |\underline{\mathbf{U}}_{df}^t| & \mathbf{M}^T \mathbf{X}_d \mathbf{M}_f |\underline{\mathbf{U}}_{df}^t| \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{gen}^t \\ \mathbf{Q}_{gen}^t \end{bmatrix};$$

Матриця $\begin{bmatrix} \mathbf{M}^T \mathbf{R}_d \mathbf{M}_f |\underline{\mathbf{U}}_{df}^t| & \mathbf{M}^T \mathbf{X}_d \mathbf{M}_f |\underline{\mathbf{U}}_{df}^t| \end{bmatrix}$ позначається як \mathbf{B}'_u , а $\mathbf{u}_s \in \mathbb{R}^{L \times 1}$ – слабкий вектор напруги шини.

3.2.2.2 Апроксимація струмів у вітках мережі

Іншим припущенням, що ми можемо зробити для мереж НН, є те, що ін'єкції реактивної потужності зазвичай невеликі, якщо порівняти їх з активними ін'єкціями. Припускаючи, що, ми виражаємо струм у вітках як:

$$\mathbf{i}_b^t = \mathbf{M}_f |\underline{\mathbf{U}}_{df}^t| \mathbf{P}^t;$$

Добуток $\mathbf{M}_f |\underline{\mathbf{U}}_{df}^t|$ позначається як \mathbf{B}'_r .

3.2.2.3 Апроксимація втрат мережі

Втрати потужності апроксимуються як лінійна кускова функція:

$$\mathbf{P}_{Loss} \approx \max\{\mathbf{L}_0^t \mathbf{P}^t, -\mathbf{L}_0^t \mathbf{P}^t, \mathbf{L}_1^t \mathbf{P}^t - \mathbf{b}^t, +\mathbf{L}_1^t \mathbf{P}^t + \mathbf{b}^t\};$$

$$\mathbf{Q}_{Loss} \approx \max\{\mathbf{L}_0^t \mathbf{Q}^t, -\mathbf{L}_0^t \mathbf{Q}^t, \mathbf{L}_1^t \mathbf{Q}^t - \mathbf{b}^t, +\mathbf{L}_1^t \mathbf{Q}^t + \mathbf{b}^t\};$$

де:

$$\mathbf{L}_0^t = \text{diag}\{i_0^{0,t}, \dots, i_l^{0,t}\} \mathbf{R}_d \mathbf{M}_f |\underline{\mathbf{U}}_{df}^t|;$$

$$\mathbf{L}_1^t = \text{diag}\{i_0^{0,t} + i_0^{1,t}, \dots, i_l^{0,t} + i_l^{1,t}\} \mathbf{R}_d \mathbf{M}_f |\underline{\mathbf{U}}_{df}^t|;$$

$$\mathbf{b}^t = -[r_{d1} i_0^{0,t} i_0^{1,t}, \dots, r_{dl} i_l^{0,t} i_l^{1,t}];$$

$$i_0^{0,t} = 0,25 \mathbf{M}_f \mathbf{P}^{max,t};$$

$$i^{1,t} = 0,75M_f P^{max,t}.$$

Графічне представлення апроксимації втрат для системи з двома шином и показано на рис. (4.1).

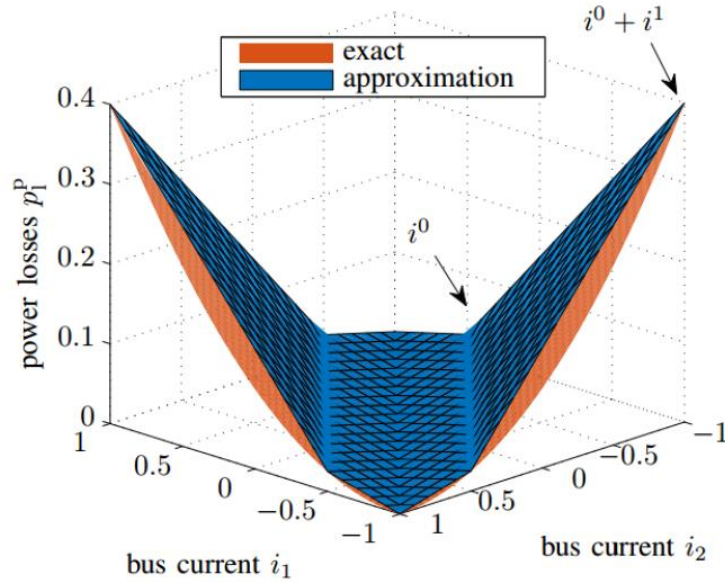


Рисунок 4.1 – Приклад апроксимації втрат потужності в лінії між двома шинами [33].

3.2.2.4 Динаміка батареї

Якщо в мережі є засоби акумуляції, нам необхідно ввести додаткові рівняння для моделювання їх динаміки. Можливий спосіб опису змінюваного в часі рівня заряду батареї на шині $i \in \{1, \dots, N-1\}$, $t \in \{2, \dots, T\}$ має вигляд:

$$S_{batt,i}^t = S_{batt,i}^{t-1} + \eta_{ch,i} P_{ch,i}^{t-1} - \frac{P_{dis,i}^{t-1}}{\eta_{dis,i}},$$

де $\eta_{ch,i}$ і $\eta_{dis,i}$ – ККД батареї для процесів заряду і розряду. Початковий заряд батареї $S_{batt,i}^1$, як правило, фіксується до 0.

3.2.2.5 Енергетичний баланс

Найбільш важливим обмеженням задачі OPF є дотримання енергетичного балансу всередині мережі, що виражається у вигляді:

$$\sum_{i=0}^{N-1} P_{gen,i}^t - \sum_{j=1}^L P_{loss,j}^t - \sum_{j=1}^L Q_{loss,j}^t - \sum_{i=0}^{N-1} P_{load,j}^t = 0.$$

3.2.2.6 Мережеві фізичні обмеження

Будь-яке рішення, запропоноване задачею оптимізації, повинно враховувати фізичні межі, пов'язані з виробництвом і споживанням електроенергії, уникаючи перенапруги, занижених напруги, перевантажень і те, що стан заряду батарей залишається між мінімальним і максимальним значенням. Ці обмеження можуть бути записані як:

$$-i_b^{max} + B_r^t P_{load}^t \leq B_r^t P_{gen}^t \leq i_b^{max} + B_r^t P_{load}^t;$$

$$u^{min} \leq u^t \leq u^{max};$$

$$P_{pr}^{min,t} \leq P_{pr}^t \leq P_{pr}^{max,t};$$

$$Q_{pr}^{min,t} \leq Q_{pr}^t \leq Q_{pr}^{max,t};$$

$$0 \leq P_{ch}^t \leq P_{batt,ch}^{max};$$

$$0 \leq P_{dis}^t \leq P_{batt,dis}^{max};$$

$$S_{batt,i}^{t=1} = S_{batt,i}^{in};$$

$$S_{batt,i}^{min} \leq S_{batt,i}^t \leq X_{batt,i};$$

$$\eta_{ch,i} P_{ch,i}^T \leq X_{batt,i} - S_{batt,i}^T;$$

$$\frac{P_{dis,i}^T}{\eta_{dis,i}} \leq S_{batt,i}^T;$$

де:

- i_b^{max} – вектор максимально допустимих струмів у гілках;
- u^{min} та u^{max} – відповідно вектори мінімальних і максимально допустимих напруг на шинах;
- $P_{pr}^{min,t}$ та $P_{pr}^{max,t}$ – вектори мінімального та максимального рівня виробництва активної потужності на шинах;
- $Q_{pr}^{min,t}$ та $Q_{pr}^{max,t}$ – вектори мінімального та максимального рівня виробництва реактивної потужності на шинах мережі;

- $P_{batt,dis}^{max}$ – вектор максимально допустимої потужності, що обмінюється з батареями.

3.2.2.7 Мережа живлення

Оскільки ми використовуємо ті ж змінні як для активного споживача, так і для мережі живлення, нам необхідно зафіксувати до нуля значення, пов'язані з батареями і споживанням першої шини (кореневого з'єднання).

$$P_{Load,0}^t = 0;$$

$$Q_{Load,0}^t = 0;$$

$$P_{ch,0}^t = 0;$$

$$P_{dis,0}^t = 0.$$

3.2.3 Задача оптимізації потоку потужності

Завдання задачі оптимізації полягає в мінімізації витрат (або максимізації доходів), з якими стикаються протягом усього періоду часу, обмінюючись потужністю з основною мережею.

Якщо c_{el}^t – ціна на електроенергію, а P_0^t – потужність, що обмінюється з мережею в момент часу $t \in \{1, \dots, T\}$ (позитивна, якщо продано до мережі живлення, негативна, якщо придбано з неї), цільову функцію задачі оптимізації можна записати:

$$\min \sum_{t=1}^T c_{el}^t P_0^t;$$

Припущення та наближення, введені досі, визначають формулювання задачі лінійного програмування оптимального потоку потужності (LP-OPF):

$$\min_y \sum_{t=1}^T c_{el}^t P_0^t; \quad (3.23)$$

за умови:

$$\mathbf{P}_{gen}^t = \mathbf{P}_{pr}^t + \mathbf{P}_{dis}^t - \mathbf{P}_{ch}^t; \quad (3.24)$$

$$\sum_{i=0}^{N-1} P_{gen,i}^t - \sum_{j=1}^L P_{loss,j}^t - \sum_{j=1}^L Q_{loss,j}^t - \sum_{i=0}^{N-1} P_{load,j}^t = 0; \quad (3.25)$$

$$\mathbf{B}_u^t \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{gen}^t \\ \mathbf{Q}_{gen}^t \end{bmatrix} - \mathbf{u}^t = \mathbf{B}_u^t \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{load}^t \\ \mathbf{Q}_{load}^t \end{bmatrix} - \mathbf{u}_s; \quad (3.26)$$

$$\mathbf{P}_{los}^t - \mathbf{L}_0^t \mathbf{P}_{gen}^t \geq -\mathbf{L}_0^t \mathbf{P}_{load}^t; \quad (3.27)$$

$$\mathbf{P}_{los}^t + \mathbf{L}_0^t \mathbf{P}_{gen}^t \geq \mathbf{L}_0^t \mathbf{P}_{load}^t; \quad (3.28)$$

$$\mathbf{P}_{los}^t - \mathbf{L}_1^t \mathbf{P}_{gen}^t \geq -\mathbf{L}_1^t \mathbf{P}_{load}^t + \mathbf{b}; \quad (3.29)$$

$$\mathbf{P}_{los}^t + \mathbf{L}_1^t \mathbf{P}_{gen}^t \geq \mathbf{L}_1^t \mathbf{P}_{load}^t + \mathbf{b}; \quad (3.30)$$

$$\mathbf{Q}_{los}^t - \mathbf{L}_0^t \mathbf{Q}_{gen}^t \geq -\mathbf{L}_0^t \mathbf{Q}_{load}^t; \quad (3.31)$$

$$\mathbf{Q}_{los}^t + \mathbf{L}_0^t \mathbf{Q}_{gen}^t \geq \mathbf{L}_0^t \mathbf{Q}_{load}^t; \quad (3.32)$$

$$\mathbf{Q}_{los}^t - \mathbf{L}_1^t \mathbf{Q}_{gen}^t \geq -\mathbf{L}_1^t \mathbf{Q}_{load}^t + \mathbf{b}; \quad (3.33)$$

$$\mathbf{Q}_{los}^t + \mathbf{L}_1^t \mathbf{Q}_{gen}^t \geq \mathbf{L}_1^t \mathbf{Q}_{load}^t + \mathbf{b}; \quad (3.34)$$

$$-i_b^{max} + \mathbf{B}_r^t \mathbf{P}_{load}^t \leq \mathbf{B}_r^t \mathbf{P}_{gen}^t \leq i_b^{max} + \mathbf{B}_r^t \mathbf{P}_{load}^t; \quad (3.35)$$

$$\mathbf{u}^{min} \leq \mathbf{u}^t \leq \mathbf{u}^{max}; \quad (3.36)$$

$$\mathbf{P}_{pr}^{min,t} \leq \mathbf{P}_{pr}^t \leq \mathbf{P}_{pr}^{max,t}; \quad (3.37)$$

$$\mathbf{Q}_{pr}^{min,t} \leq \mathbf{Q}_{pr}^t \leq \mathbf{Q}_{pr}^{max,t}; \quad (3.38)$$

$$0 \leq \mathbf{P}_{ch}^t \leq \mathbf{P}_{batt,ch}^{max}; \quad (3.39)$$

$$0 \leq \mathbf{P}_{dis}^t \leq \mathbf{P}_{batt,dis}^{max}; \quad (3.40)$$

$$S_{batt,i}^{t=1} = S_{batt,i}^{in}; \quad (3.41)$$

$$S_{batt,i}^{min} \leq S_{batt,i}^t \leq X_{batt,i}; \quad (3.42)$$

$$S_{batt,i}^t = S_{batt,i}^{t-1} + \eta_{ch,i} P_{ch,i}^{t-1} - \frac{P_{dis,i}^{t-1}}{\eta_{dis,i}}; \quad (3.43)$$

$$\eta_{ch,i} P_{ch,i}^T \leq X_{batt,i} - S_{batt,i}^T; \quad (3.44)$$

$$\frac{P_{dis,i}^T}{\eta_{dis,i}} \leq S_{batt,i}^T; \quad (3.45)$$

де \mathbf{y} – набір змінних задачі оптимізації:

$$\mathbf{y} = \{\mathbf{y}^1, \dots, \mathbf{y}^T\}; \quad (3.46)$$

для $\forall t \in \{1, \dots, T\}$

$$\mathbf{y}^t = \{\mathbf{u}^t, \mathbf{P}_{pr}^t, \mathbf{Q}_{pr}^t, \mathbf{P}_{ch}^t, \mathbf{P}_{dis}^t, \mathbf{P}_{los}^t, \mathbf{Q}_{los}^t, \mathbf{S}_{batt}^t\}. \quad (3.47)$$

Матриці \mathbf{L}_0^t , \mathbf{L}_L^t , \mathbf{B}_r^t і \mathbf{B}_u^t залежать від напруги шини \underline{U}_t , яка спочатку невідома. Спосіб обійти це, як представлено в [33], полягає в тому, щоб спочатку встановити напруги до 1 в.о., а потім ітеративно вирішити лінійну задачу ОПП. Після кожної ітерації h , струми обчислюються на прямій стадії і напруги оновлюються на зворотній стадії. Нові напруги використовуються для оцінки матриць \mathbf{L}_0^t , \mathbf{L}_L^t , \mathbf{B}_r^t і \mathbf{B}_u^t для наступної ітерації, поки різниця між значеннями \underline{U} двох послідовних ітерацій не перевищує певний граничний межі.

Представлена задача ПЗР-ОПП, оптимізує стратегію керування протягом всього модельованого періоду, знаючи на кожному кроці майбутні ціни на електроенергію, майбутнє споживання навантаження і майбутнє потенційне виробництво електроенергії. Завдяки цій інформації вона здатна максимально ефективно вирішувати питання виробництва, зберігання, купівлі та продажу електроенергії. Це, безумовно, ідеалістична ситуація, оскільки в реальному світі майбутнє надзвичайно важко передбачувати. Однак отримані результати, що імітують реалістичні сценарії та їх вирішення за допомогою цього централізованого контролера, можуть бути корисні для створення навчального набору для моделі КН, як це представлено в розділі 3.1.

Висновки:

1. В даному розділі було формалізовано об'єднання активних споживачів всередині локальної електроенергетичної системи. Наведено математичні описи процесів генерації активної та реактивної енергії активними споживачами та динаміки роботи засобів акумуляції електроенергії.

2. Для оптимальної роботи локальної електроенергетичної системи було запропоновано впровадження децентралізованої системи керування

активними споживачами, що базується на використанні алгоритмів контрольованого навчання та оптимізації потоку потужності та дозволяє оцінити ефективність децентралізованих методів керування в ЛЕС.

3. Для алгоритму керованого навчання розроблено процедуру навчання, що базується на використанні статистичних оцінювачів генерації активної та реактивної енергії, процесів зарядження та розрядження засобів акумуляції електроенергії. Для перевірки прогнозованих дій активного споживача запропоновано алгоритм перевірки прогнозу вказаних процесів, що здійснюються активним споживачем. Це дозволяє сформувати систему керування, що враховуватиме особливості роботи елементів ЛЕС.

4. Для оптимізації потоків потужності всередині ЛЕС була сформована оптимізаційна задача мінімізації втрат активного споживача, що передбачає підтримку надійного стану ЛЕС. Оптимізаційна задача враховує прогнозовані значення генерації електроенергії PV-установками активного споживача, можливості до зберігання енергії засобами акумуляції електроенергії, рівень напруги на шинах активних споживачів та втрати потужності всередині ЛЕС.

4 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

У цьому розділі використовуємо алгоритм КН, сформульований у розділі 3, на модельованій тестовій мережі з різними сценаріями споживання навантаження, потенційними значеннями виробництва електроенергії та цінами на електроенергію на ринку. Для оцінки ефективності методів буде порівняно метод КН з двома іншими алгоритмами керування: з децентралізованою стратегією керування за «Правилом великого пальця»; централізованої оптимізованої стратегії, , для кращого відображення якості здійснення процесів керування.

4.1 Тестова локальна електроенергетична система

Схеми керування моделюються на лінійній мережі, що складається з кореневого з'єднання, та N_{pro} кількістю активних споживачів подібно на рис.3.1. Кожна вітка, що зв'язує дві шини, має однакову довжину, такий же активний та реактивний опір. Моделювання виконується протягом періоду, що являє собою весь рік, з кроком одну годину. Загальна характеристика досліджуваної ЛЕС:

- Кількість шин $N = 15$;
- Кількість активних споживачів $N_{pro} = 14$;
- Кількість віток $L = 14$;
- $\Delta t = 1$ год.;
- Розрахунковий період $T = 8760$;
- Активний опір лінії $R_{d1} = R_{d2} = \dots = R_{dL} = 0.025 \, \Omega$;
- Реактивний опір лінії $X_{d1} = X_{d2} = \dots = X_{dL} = 0.005 \, \Omega$;
- Номінальна напруга мережі $U_n = 400 \, \text{V}$;
- Максимально допустима напруга 1.10 в.о.;
- Мінімально допустима напруга 0.90 в.о.;
- Для живлячої мережі $P_{pr,o}^{max,t} = 1 \, \text{MW}$, $P_{pr,o}^{min,t} = -1 \, \text{MW}$, $Q_{pr,o}^{max,t} = 1 \, \text{MW}$, $Q_{pr,o}^{min,t} = -1 \, \text{MW}$, $\forall t \in \{1, \dots, T\}$.

Кожен споживач всередині спільноти визначається ідентифікаційним номером (його позиція вздовж мережі), кількістю мешканців відповідного житла, встановленою потужністю PV та засобів акумуляції. Ця інформація наведена в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Вхідні дані про активних споживачів в ЛЕС

№	Кількість жителів в будинку	Встановлена потужність PV-установки, кВт	Встановлена потужність батареї, кВт*год
1	1	2	2
2	1	2	2
3	2	3	2
4	2	3	2
5	2	3	2
6	3	3,5	5
7	3	3,5	5
8	3	3,5	5
9	4	5	6
10	4	5	6
11	4	5	6
12	4	5	6
13	5	7	8
14	5	7	8

4.2 Тестові сценарії моделювання

Для створення повного сценарію, який може бути використаний для перевірки схем керування, після визначення характеристики тестової мережі необхідно визначити профілі навантаження, максимальний виробничий потенціал і ціни на електроенергію протягом усього періоду часу. Три різні сценарії, названі S1, S2 і S3, генеруються наступним чином.

4.2.1 Профілі навантаження активних споживачів

Для усунення суб'єктивної складової дослідження генерування профілів навантаження кожного активного споживача отримано з використанням моделі, наведеної в [86]. Модель дозволяє генерувати профіль навантаження

індивідуального житла за добу, встановлюючи кількість мешканців будинку, вказуючи тип дня (будні або вихідні дні), місяць і які є встановлені прилади.

Щоб отримати множину $P_{Load,i}^t$ і $Q_{Load,i}^t \forall t \in \{1, \dots, 8760\}, i \in \{1, \dots, N-1\}$ модель працювала кілька разів, отримуючи дані для будніх та вихідних днів для кожного місяця року. Прилади, пов'язані з житлом, були обрані випадковим чином. Модель також забезпечує середній коефіцієнт потужності для приладів, щоб отримати реактивну потужність, виходячи зі значень активної потужності. На рис. 4.1 наведено приклад споживання електричної енергії активним споживачем за добу в червні в будинку з двома жителями.

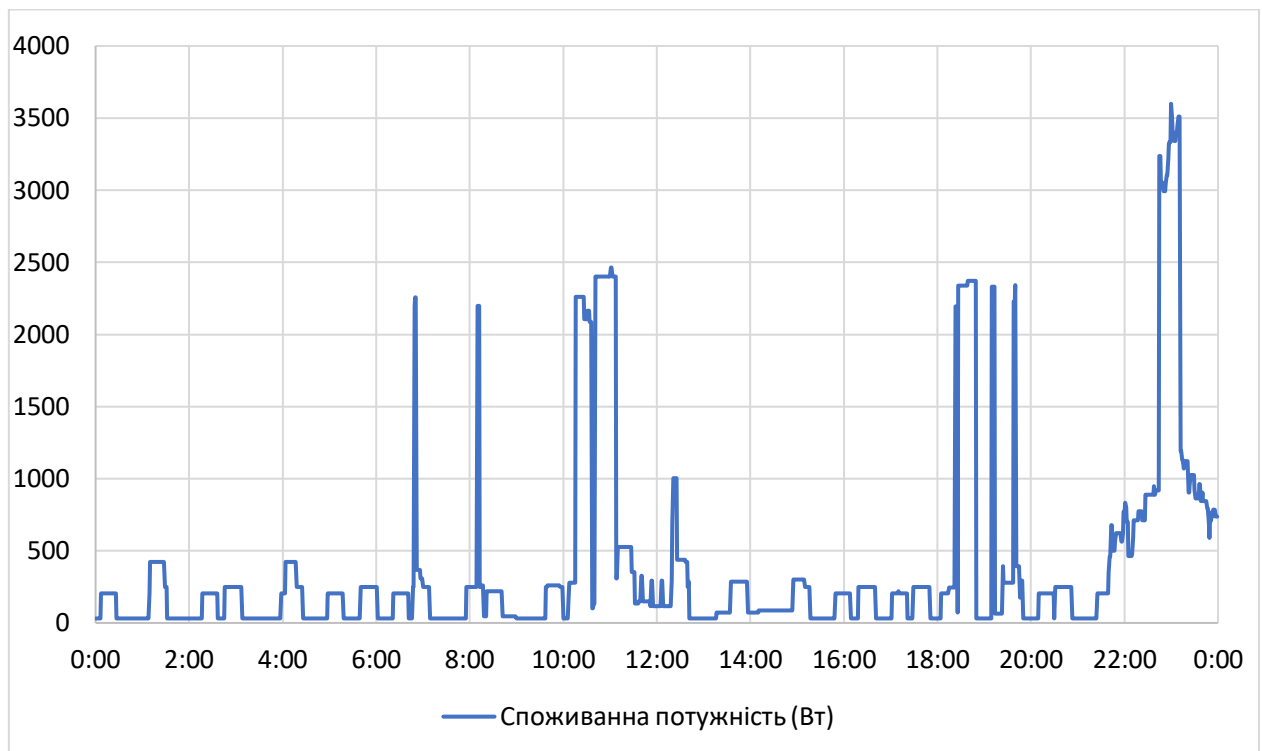


Рисунок 4.1 – Добовий профіль споживання енергії активним споживачем

4.2.2 Профілі сонячного випромінювання

Набори максимального виробничого потенціалу $P_{pr,i}^{max,t}$, $t \in \{1, \dots, 8760\}, i \in \{1, \dots, N-1\}$ отримані з використанням реальних даних сонячної, оцінених у відносних одиницях, потім відносні значення множаться на номінальну потужність установки фотоелектричних панелей кожного

активного споживача. Приклад сонячного випромінювання в трьох сценаріях для одного місяця (червень) показаний на рис. 4.2.

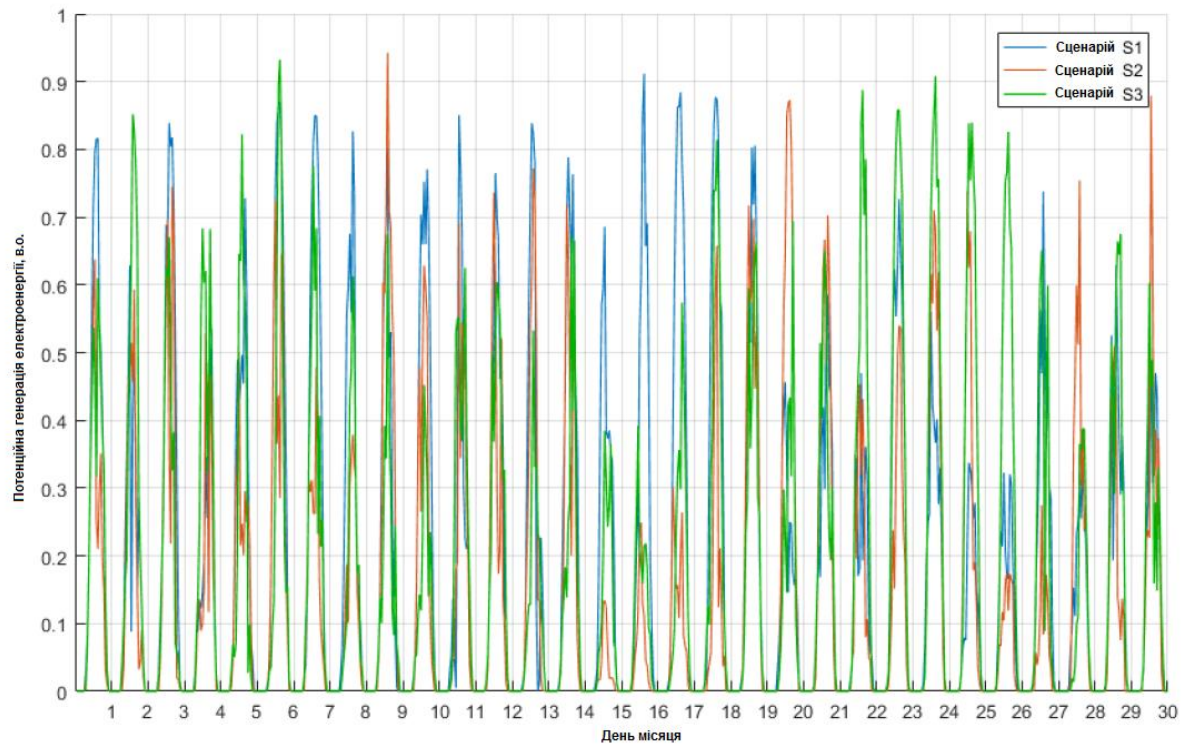


Рисунок 4.2 – Потенційна генерація в трьох сценаріях для одного місяця

4.2.3 Ціни на електроенергію

Часові ряди цінових векторів $c_{el,t}^t \in \{1, \dots, 8760\}$, що використовуються в сценаріях, відповідають цінам, які спостерігались на ринку електроенергії України минулих років. Кожен сценарій стосується одного року. Середньодобова ціна за рік у трьох сценаріях показана на рис. 4.3.

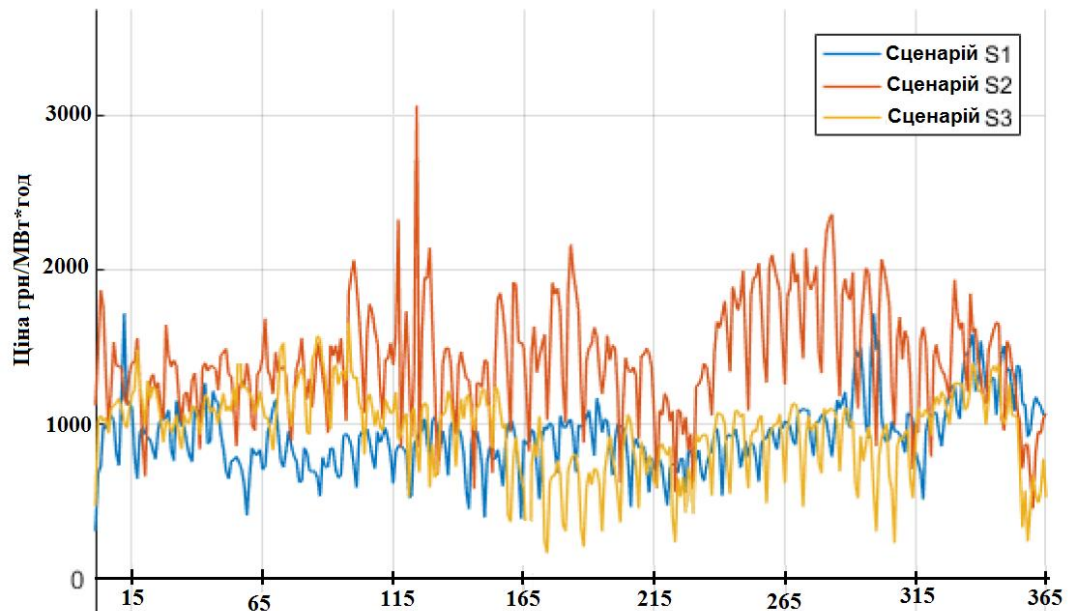


Рисунок 4.3 – Середньодобова ціна електроенергії в тестових сценаріях

4.3 Алгоритм «Правила великого пальця»

Щоб отримати уявлення про те, наскільки хорошими або поганими є продуктивність алгоритму КН, може бути корисно порівняти результати, отримані в тестових сценаріях, з результатами, отриманими іншими методами. Альтернативна децентралізована стратегія полягає у визначенні набору визначених, заснованих на порогах, правил прийняття рішень, що діють для кожного активного споживача. Цей набір правил розроблений таким чином, що він забезпечує безпеку системи, а потім намагається мінімізувати загальні витрати спільноти. Таким чином, перший крок цього алгоритму "Правила великого пальця" (ПВП) - перевірити, чи існує ризик перенапруги або недостатнього рівня напруги на шині, і в цьому випадку, щоб зорієнтувати дії активного споживача для уникнення цього (повністю заряджати/розряджати засоби акумуляції та максимізувати/мінімізувати виробництво енергії). У випадку, коли безпека електромережі здається дотримується, рішення накладаються з урахуванням ціни на електроенергію на даному проміжку часу (коли вона вище/нижче заздалегідь визначеної ціни, накладає заздалегідь визначену дію). Алгоритм використовує кожен активний споживач і на

кожному етапі часу t , і він може бути виражений, наприклад, у наступному вигляді:

if $|\underline{v}_i^t| \leq 0.91 pu$

$$P_{pr,i}^t = P_{pr,i}^{max,t}$$

$$Q_{pr,i}^t = Q_{pr,i}^{max,t}$$

$$P_{dis,i}^t = S_i^t \eta_{d,i}$$

$$P_{ch,i}^t = 0$$

else if $|\underline{v}_i^t| \geq 1.09 pu$

$$P_{pr,i}^t = 0$$

$$Q_{pr,i}^t = -Q_{pr,i}^{max,t}$$

$$P_{ch,i}^t = \frac{X_{bat,i} - S_i^t}{\eta_{c,i}}$$

$$P_{dis,i}^t = 0$$

else

$$P_{pr,i}^t = P_{pr,i}^{t,max}$$

$$Q_{pr,i}^t = 0$$

if $c_{el}^t \geq c_{el}^+$

$$P_{ch,i}^t = 0$$

if $P_{pr,i}^t \geq P_{Load,i}^t$

if $S_i^t \geq 0.3 X_{batt,i}$

$$P_{dis,i}^t = (S_i^t - 0.3 X_{batt,i}) \eta_d^{(i)}$$

else

$$P_{dis,i}^t = 0$$

else

$$P_{dis,i}^t = S_i^t \eta_d^{(i)}$$

```

else if  $c_{el}^t \leq c_{el}^-$ 
    if  $P_{pr,i}^t \geq P_{Load,i}^t$ 
        if  $P_{pr,i}^t - P_{Load,i}^t \leq (X_{batt,i} - S_i^t) \eta_c^{(i)}$ 
             $P_{ch,i}^t = \frac{P_{pr,i}^t - P_{Load,i}^t}{\eta_c^{(i)}}$ 
        else
             $P_{ch,i}^t = \frac{X_{batt,i} - S_i^t}{\eta_c^{(i)}}$ 
    else
        if  $S_i^t \geq 0.3 X_{batt,i}$ 
             $P_{dis,i}^t = (S_i^t - 0.3 X_{batt,i}) \eta_d^{(i)}$ 
        else
             $P_{ch,i}^t = \frac{0.3 X_{batt,i} - S_i^t}{\eta_c^{(i)}}$ 

if  $P_{ch,i}^t > P_{batt,i}^{max}$ 
     $P_{ch,i}^t = P_{batt,i}^{max}$ 

if  $P_{dis,i}^t < P_{batt,i}^{max}$ 
     $P_{dis,i}^t = P_{batt,i}^{max}$ 

```

Порогові значення c_{el}^+ і c_{el}^- заздалегідь визначені значення, що визначають, відповідно, коли ціна на електроенергію є високою або низькою (в даному випадку вони встановлюються на рівні 2 і 0,5 значення середньої ціни сценаріїв навчання відповідно). Алгоритм розрахований на те, щоб засоби акумуляції завжди зберігали мінімальний рівень $SoC = 30\%$ і повністю розряджати батарею тільки тоді, коли є дефіцит виробництва електроенергії, а ціна на електроенергію дуже висока. Коли виробник має виробничий надлишок, він вводить його в мережу або в батарею залежно від ціни. Використання такого роду алгоритмів, безумовно, є грубим методом для прийняття рішень, і він орієнтований на підтримку єдиного активного споживача більше, ніж об'єднання споживачів, але це все ще розумний спосіб контролювати дії споживача, коли немає інших стратегій, і він має переваги в тому, що це дуже легко реалізувати в контролері.

4.4 Результати моделювання системи керування АС

Перш ніж розглядати сценарії тестування, сценарії навчання оптимізуються за допомогою алгоритму ПЗР-ОПП і екстраполюється набір для алгоритму КН. Таким чином, сценарії S1, S2 і S3 моделюються на тестовій мережі, яка контролюється трьома стратегіями керування. Індекс, що використовується для порівняння схем, – це загальні витрати, які несе громада протягом року (тобто також цільова функція ПЗР-ОПП).

Для наочності результатів нижче наведено результат керування одного активного споживача, що знаходиться під номером 6 у табл. 4.1. На рис. 4.4 представлені значення споживаної потужності та власної генерації PV установками. Також було розраховано потік потужності через шини активного споживача до здійснення керування та після застосування алгоритму КН, що показано на рис. 4.5 та рис 4.6 відповідно.

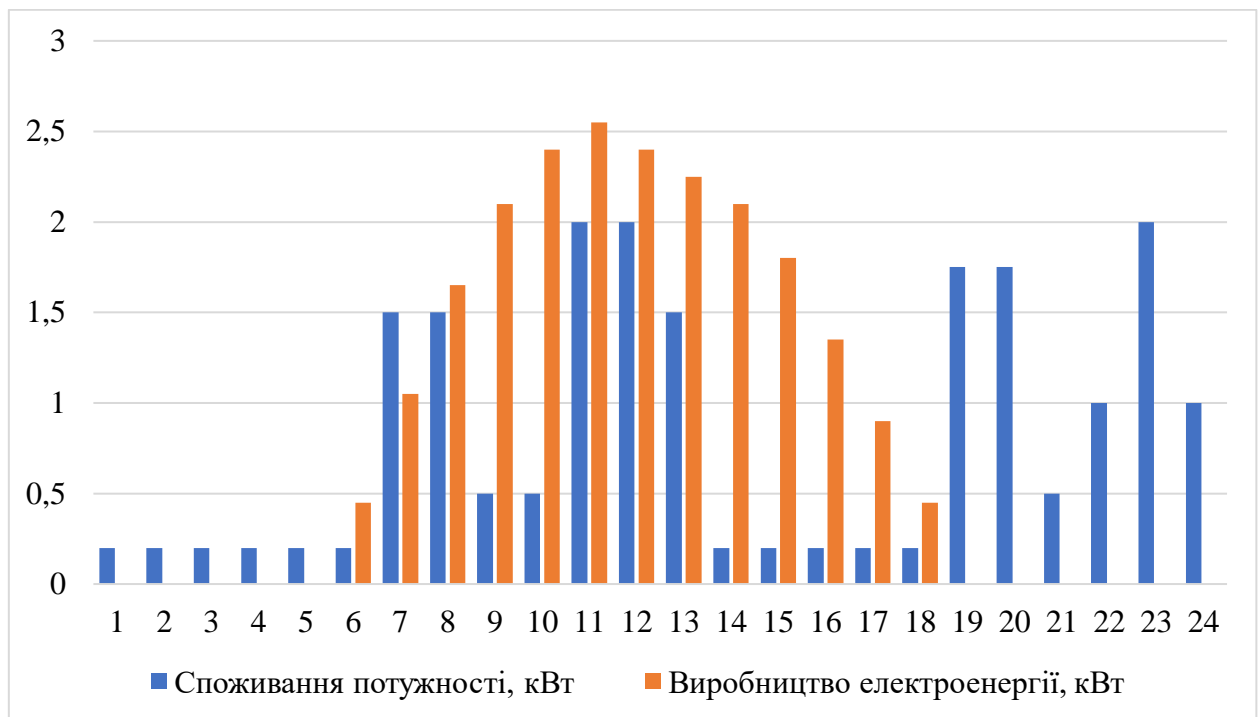


Рисунок 4.4 – Характеристика власного споживання та генерації електроенергії активного споживача

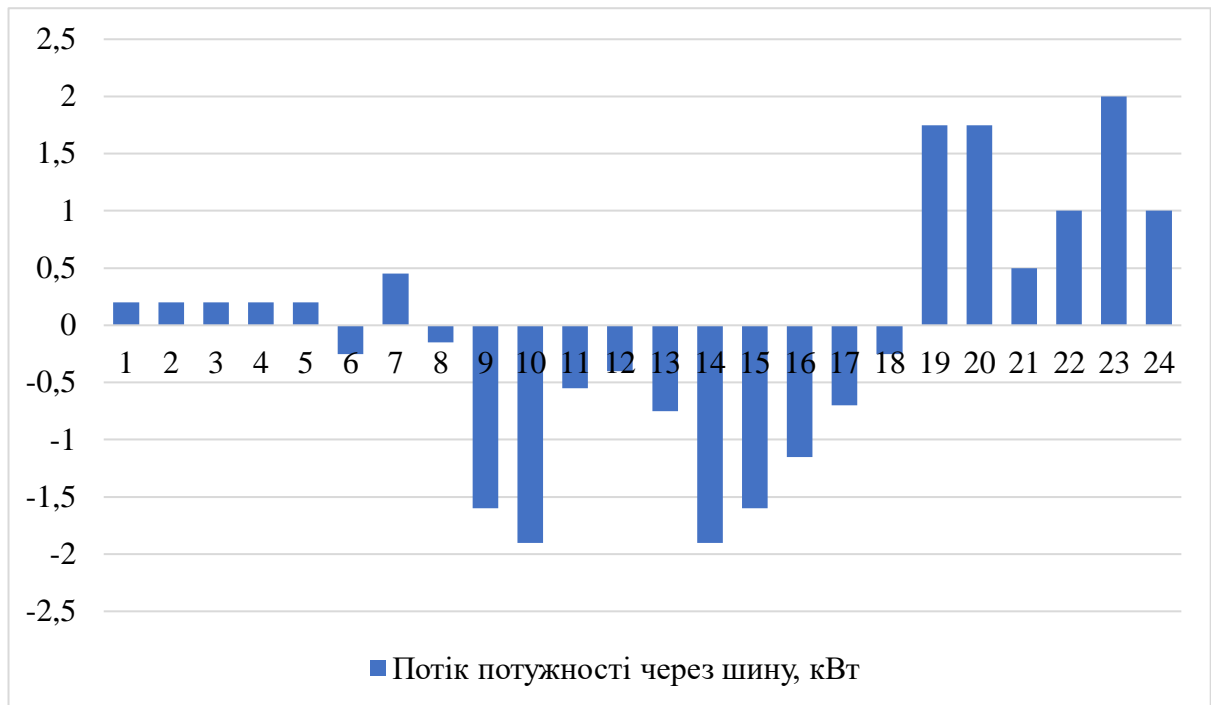


Рисунок 4.5 – Потік потужності через шину активного споживача до здійснення керування

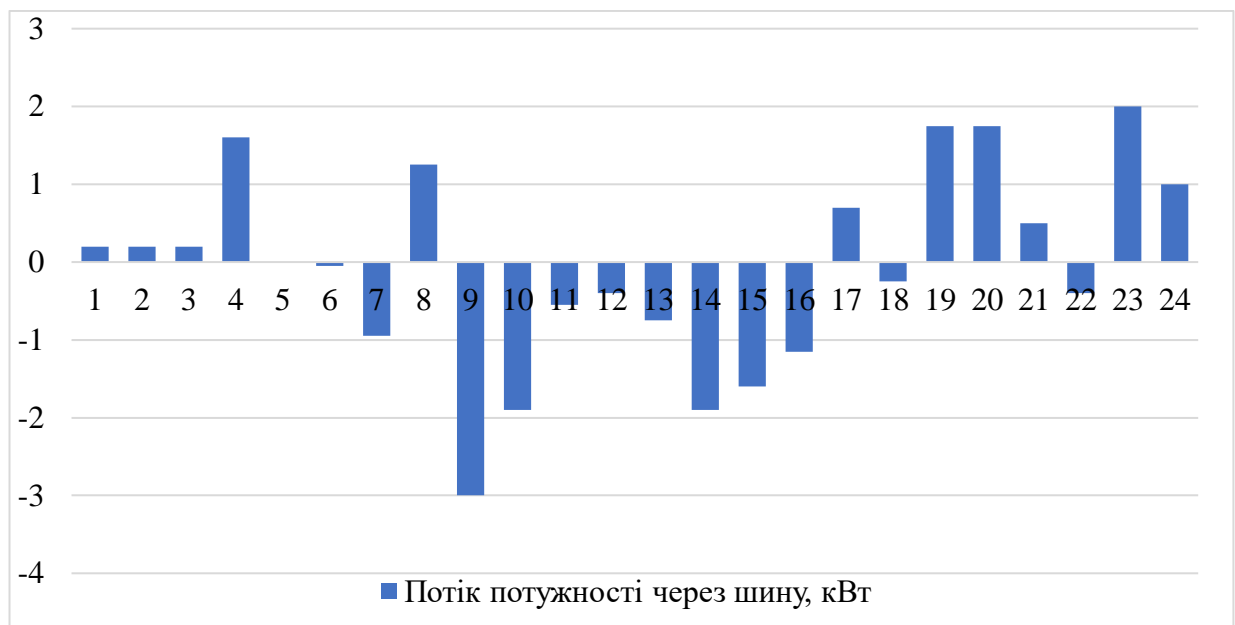


Рисунок 4.6 – Потік потужності через шину активного споживача після застосування алгоритмів керування

Результатом застосування алгоритму КН до тестової схеми є набір рекомендацій активному споживачу щодо зміни значень виробництва активної та реактивної потужності, зарядки та розрядки засобів акумуляції

енергії. Для вказаного споживача в розрізі одного дня червня на рис. 4.7 наведено схему керування процесом зарядки та розрядження батареї.

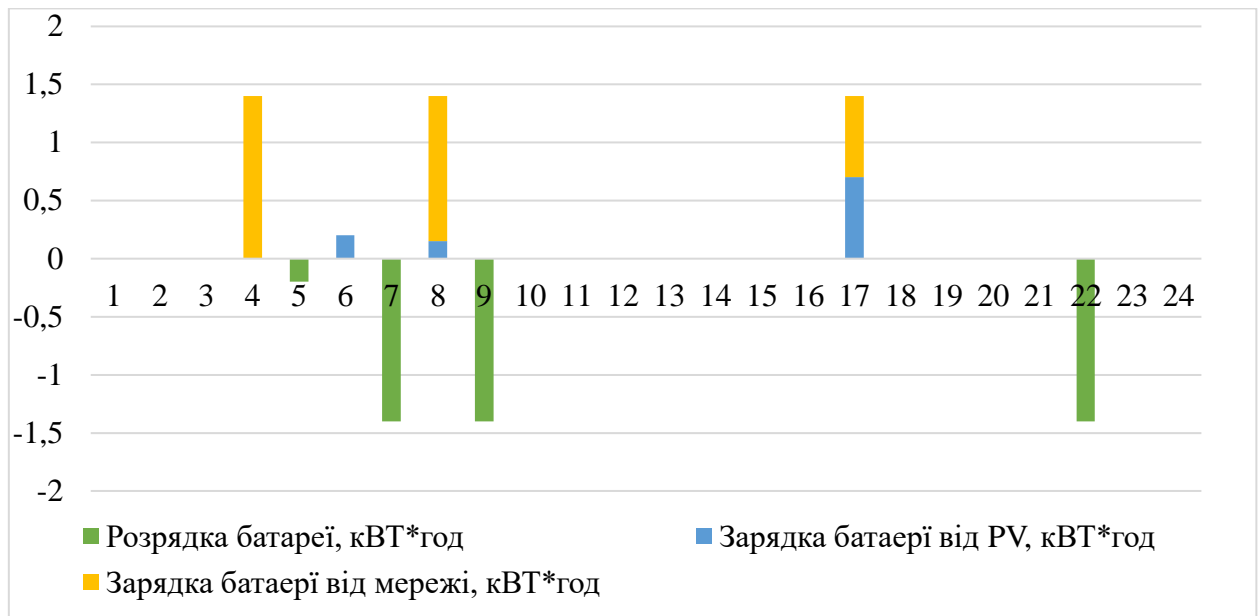


Рисунок 4.7 – Процес зарядження/розрядження батареї

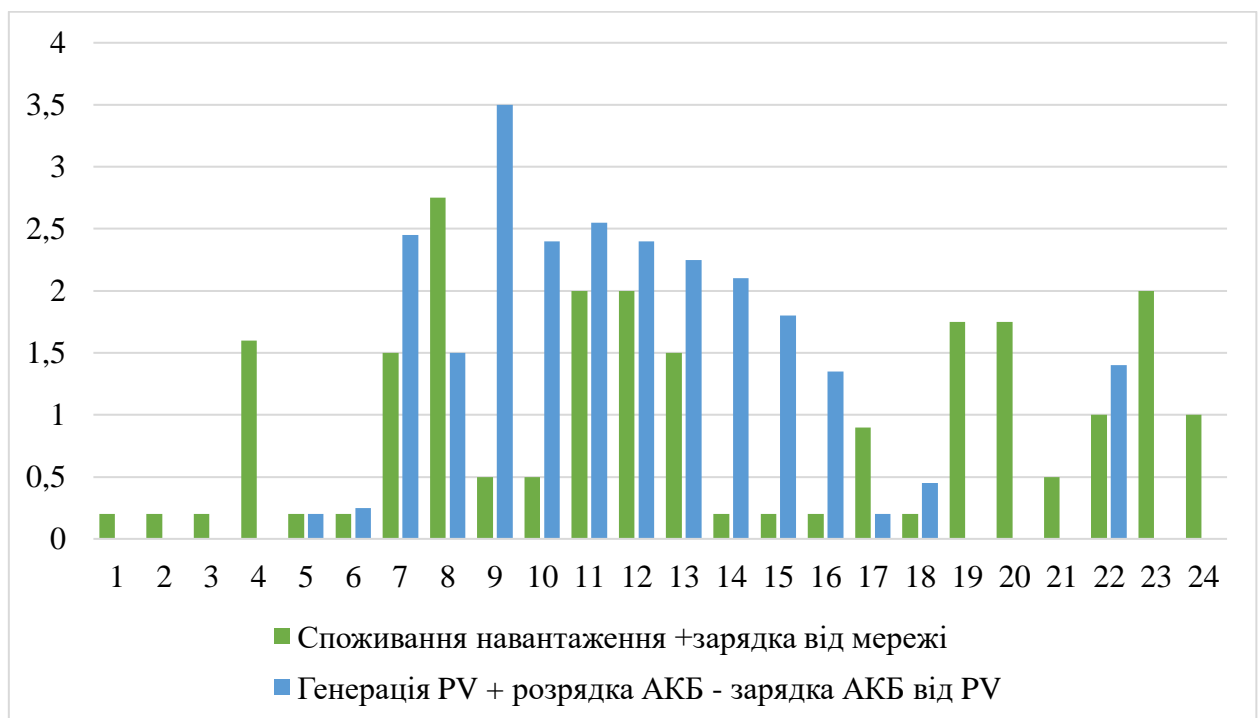


Рисунок 4.8 – Прогнозовані графіки взаємодії активного споживача з мережею.

Результатом децентралізованого керування неведеним активним споживачем є алгоритм роботи акумуляторної батареї наведений на рис. 4.10. Алгоритм націлений на зменшення витрат на купівлю електроенергії з мережі та збільшення доходів від продажу накопиченої засобами акумуляції та згенерованої PV установками електроенергії. Рішення про накопичення та розрядження батареї приймалися орієнтуючись на реальні ціни на ринку. В прикладі було розглянуто ціни моментом на 1 червня 2016 року, що наведені в додатку А. За рахунок здійснення контролю активного споживача було збільшено прибуток активного споживача у вказаний день з 3,6 грн до 5,72 грн. Витрати на купівлю електроенергії без здійснення керування складали 12,5 грн, зі здійсненням керування 13,49 грн. Доходи від продажу електроенергії в мережу без здійснення керування складали 16,11 грн, за рахунок керування доходи зросли до 19,22 грн.

Результати розрахунку витрат, доходів та прибутку не є вражаючими, але це пояснюється тим, що загальна встановлена потужність PV установок даного активного споживача 3 кВт, а загальна ємність акумуляторних батарей 2 кВт*год. За даних умов майже вся згенерована електроенергія витрачалась на покриття власного споживання. При розгляді всієї спільноти активних споживачів враховуються показники надійності мережі, можливість обміну електроенергії між активними споживачами ЛЕС, що дозволяє значно збільшити вигоду від впровадження системи керування в ЛЕС.

Чисельні результати моделювання наведені в табл. 4.2. Централізований контролер досягає найкращого результату в кожному сценарії, витрати, які виникають при алгоритмі КН в сценаріях S1 і S3, нижчі, ніж ті, які понесли від алгоритму ПВП, тоді як в сценарії S2 КН призводить до найгіршого серед трьох стратегій.

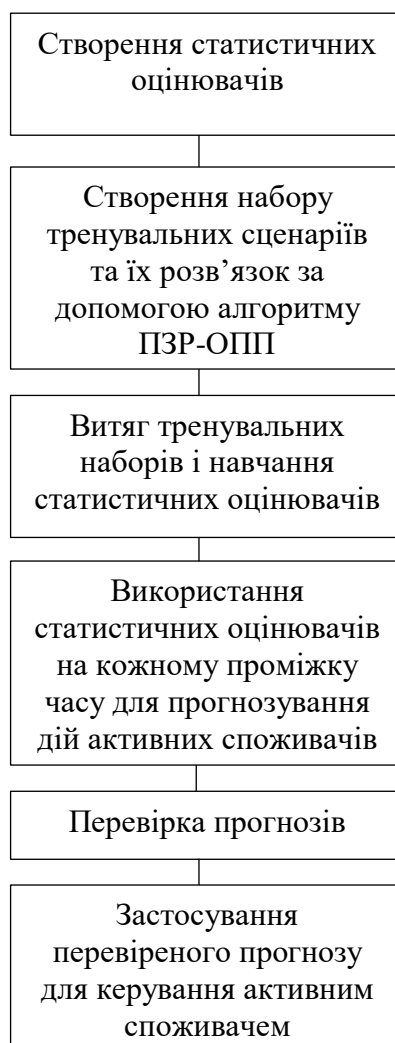


Рисунок 4.9 – Узагальнена структура КН-алгоритму, що контролює дії активного споживача

Таблиця 4.2 – Загальні річні витрати активних споживачів в ЛЕС

Загальні річні витрати, грн.			
Сценарій	S1	S2	S3
Алгоритм ПЗР-ОПП	1105,54	2121,16	1837,8
Алгоритм КН	2711,44	7832,43	5123,09
Алгоритм ПВП	5143,32	6501,94	5807,77

Більш глибоке розуміння поведінки стратегій може бути отримано з урахуванням рішень активних споживачів та електричного стану мережі протягом року.

Основна причина, чому виробництво електроенергії за допомогою PV-установок вимагає контролю та згортання, полягає в тому, що в деяких випадках генерування занадто великої потужності та введення її в мережу призводить до надмірної перенапруги в мережі або перевантажень. Коли це відбувається, інвертори фотоелектричних блоків повинні бути відключені, і споживач витрачає сонячне випромінювання. Часткове скорочення загального обсягу виробництва, щоб запобігти відключенню, у цих випадках було б кращою альтернативою для активного споживача. Алгоритм ПВП не надає цього варіанту (коли існує ризик перенапруги, він встановлює виробництво до нуля), на відміну від ПЗР-ОПП і КН-алгоритмів. Відсоток загального потенційного виробництва, який був фактично вироблений, показаний у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Скорочення виробництва електроенергії PV установками

Річне скорочення виробництва електроенергії			
Сценарій	S1	S2	S3
Алгоритм ПЗР-ОПП	7,01%	11,20%	9,69%
Алгоритм КН	11,13%	32,78%	14,80%
Алгоритм ПВП	11,91%	13,46%	15,12%

Інша відповідна відмінність між схемою керування може спостерігатися при використанні систем акумуляції. Алгоритм ПЗР-ОПП розраховує на те, що споживачі часто обмінюються електроенергією з батареями, принаймні одна система зберігання всередині спільноти зберігає або віддає електроенергію більшу частину часу, щоб купувати енергію, коли вона є доступною та продавати коли це дорого

Два інших алгоритми замість цього мають набагато меншу перевагу присутності засобів акумуляції, їх зарядка та розрядка відбувається менш ефективним способом.

4.5 Обмінна потужність в ЛЕС

Як один з критеріїв для створення системи керування ЛЕС та формування оптимізаційної задачі оптимального потоку потужності може бути значення обмінної потужності в ЛЕС. Оскільки всередині ЛЕС наявні різноманітні ДРГ з різними параметрами установок генерації всередині мережі виникають потоки обмінної потужності, що можуть чинити негативний вплив на показники якості електроенергії та надійності ЛЕС. Оцінювання величини обмінної потужності має вагомий вплив в разі роботи ЛЕС в «острівному» режимі, оскільки, в такому випадку ЛЕС сама відповідає за показники якості електроенергії.

Для оцінки обмінних процесів в ЛЕС було досліджено систему з двома генераторами та спільним навантаженням, що показано на рис. 4.10.

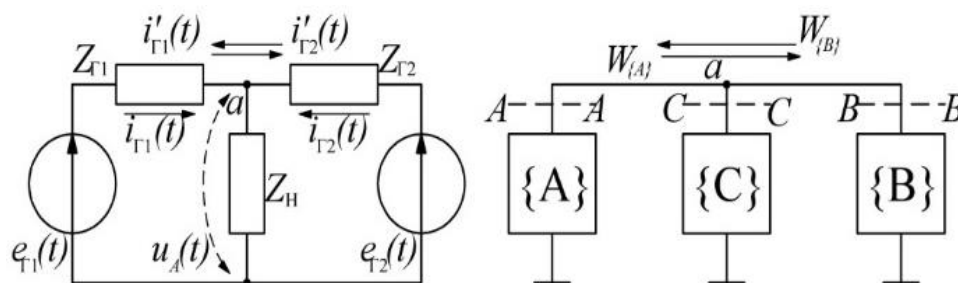


Рисунок 4.10 – Схема ЛЕС з двома генераторами та спільним навантаженням

На рис.4.10 агенти «А» та «В» є агентами генерації з різноманітними джерелами електроенергії, агент «С» відіграє роль навантаження. МАС керування ЛЕС може також використовуватись для керування системою в «острівному» режимі роботи ЛЕС. Крім вищевказаних параметрів оптимізації роботи ЛЕС необхідно врахувати явище обмінних процесів всередині ЛЕС.

Для деталізації кількісної оцінки взаємного впливу використаємо поняття енергетично-незмінного тану (ЕНС)[87]. ЕНС системи – це стан, що характеризується інтервалом $(t_{i-1} - t_i)$ роботи системи T_T , для якого незмінними є напрямки потоків енергії через виділені (контрольовані) перетини. Графічне

представлення цих процесів ми здійснюємо за допомогою графа зміни стану (ГЗС) – $\Gamma_{ЗС}\{V_{ЗС}, H_{ЗС}\}$, що визначає відношення між елементами вершин $V_{ЗС}$ та дуг $H_{ЗС}$. Множина вершин $V_{ЗС}$ включає елементи системи, а дуги $h_{ЗС}$ ($h_{ЗС} \in H_{ЗС}$) відображають наявні зв'язки між елементами множин системи на виділеному інтервалі ЕНС.

Можливі ЕНС для систем 1Г–2Н та 2Г–1Н наведено відповідно в табл. 4.4, де індексами «Г» позначено режим генерації, а «С» – режим споживання електроенергії елементами системи. Зазначимо, що інтервал t_i^s тривалості i -го ЕНС може бути незв'язаним. Табл. 4.4 дозволяє визначити відповідні струми, коли є передача електроенергії між двома елементами системи (між вузлами j_1 та j_2). Наприклад, струм генератора в системі 1Г–2Н може бути представлений у вигляді

$$i(t) = \sum_i i_{\Gamma(i)}(t); i_{\Gamma(i1)}(t) \cap i_{\Gamma(i2)}(t) = 0; t \in [0, T];$$

$$\sum_i t_i^s = T_T; i = 1, \dots, 6.$$

Для аналізу взаємного впливу в системі 1Г–2Н розглядаються складові реактивного струму на кожному ЕНС, тоді як для схеми 2Г–1Н потрібно розглядати окремо як реактивні, так і активні струми на кожному ЕНС.

Таблиця 4.4 – Можливі ЕНС досліджуваної ЛЕС

№ ЕНС	Система 1Г – 2Н			№ ЕНС	Система 2Г – 1Н		
	Стан Г	Стан Н1	Стан Н2		Стан Г1	Стан Г2	Стан Н
1	Г	С	С	1	Г	Г	С
2	Г	Г	С	2	Г	С	С
3	Г	С	Г	3	С	Г	С
4	С	Г	С	4	С	С	Г
5	С	С	Г	5	С	Г	Г
6	С	Г	Г	6	Г	С	Г

Під час аналізу локальних систем електропостачання виникає необхідність оцінити вплив елементів (груп елементів) на елементи (групи елементів) підключених до одного вузла системи. В ЛСЕ виникає енергообмін не пов'язаний з порушенням ПЯЕ (несинусоїдальністю, несиметрією тощо) та наявністю реактивних елементів, а пов'язаний з взаємодією декількох різнотипних генераторів. У такому випадку є доцільним проводити аналіз взаємних потоків енергії на періоді з виділенням ЕНС.

Взаємний вплив груп елементів ЛСЕ визначається з врахуванням обмінної потужності (4.1) [88–90]:

$$Q_{\text{ОБ.}\{i\}} = \frac{1}{T} \int_0^{t^+} u_{an}(t) i_{p\{i\}}(t) dt, \quad (4.1)$$

де $i_{p\{i\}}(t)$ – реактивна складова струму в i -му ланцюзі ЛСЕ; $u_{an}(t)$ – миттєве значення напруги у вузлі a .

Обмінна потужність, що характеризуватиме обмінні процеси у вузлі a між групами елементів автономної системи електроживлення $\{A\}$, $\{B\}$ та $\{C\}$ будемо визначати за формулою (4.2):

$$Q_{\text{ОБ}} = \sum_{i=1}^n Q_{\text{ОБ.}\{i\}} = Q_{\text{ОБ.}\{A\}} + Q_{\text{ОБ.}\{B\}} + Q_{\text{ОБ.}\{C\}}. \quad (4.2)$$

Частка впливу i -ої групи елементів на автономну систему електроживлення визначається за формулою (4.3):

$$\Delta_{\{i\}} = \frac{Q_{\text{ОБ.}\{i\}}}{Q_{\text{ОБ}}}, \text{ в.о.} \quad (4.3)$$

Кожному елементу (групі елементів) ЛСЕ на деякому інтервалі часу відповідає певний ЕНС. В межах ЛСЕ часові інтервали ЕНС не співпадають для елементів (груп елементів) і розділяють кожний елемент (групу елементів) за режимом. Деталізація ЕНС представлена в табл. 4.5. Знак «+» або «-» в табл. 4.5 показує напрямок потоку енергії для i -го ЕНС.

Таблиця 4.5 – Рівняння балансу для ЕНС ЛЕС

№ ЕНС	Режим роботи групи елементів ЛСЕ			Рівняння балансу на i -му ЕНС
	{A}	{B}	{C}	
1	Г	Г	С	$W_{\{A\}.1}^+ + W_{\{B\}.1}^+ = \int_0^{t_1} p_{\{C\}}(t)dt + W_{\text{ОБ}\{C\}.1}$
2	Г	С	С	$W_{\{A\}.2}^+ = \int_0^{t_2} p_{\{C\}}(t)dt + W_{\text{ОБ}\{C\}.2} - W_{\{B\}.2}^-$
3	С	Г	С	$W_{\{B\}.3}^+ = \int_0^{t_3} p_{\{C\}}(t)dt + W_{\text{ОБ}\{C\}.3} - W_{\{A\}.3}^-$
4	Г	С	В	$W_{\{A\}.4}^+ = -W_{\{B\}.4}^-; W_{\text{ОБ}\{C\}.4} = \int_0^{t_4} p_{\{C\}}(t)dt$
5	С	Г	В	$W_{\{B\}.5}^+ = -W_{\{A\}.5}^-; W_{\text{ОБ}\{C\}.5} = \int_0^{t_5} p_{\{C\}}(t)dt$
6	Г	В	С	$W_{\{A\}.6}^+ = \int_0^{t_6} p_{\{C\}}(t)dt + W_{\text{ОБ}\{C\}.6}$
7	В	Г	С	$W_{\{B\}.7}^+ = \int_0^{t_7} p_{\{C\}}(t)dt + W_{\text{ОБ}\{C\}.7}$
8	В	В	В	$W_{\text{ОБ}\{C\}.8} = \int_0^{t_8} p_{\{C\}}(t)dt$

На рис. 4.11 – 4.13 наведено результати розрахунку зміни значення обмінної потужності в ЛЕС при зміні параметрів ДРГ та навантаження. Як видно з вказаних рисунків зміна параметрів ЛЕС може викликати появу обмінної потужності в мережі, що веде до погіршення стану мережі. Вище сказане веде до того, що у «острівному» режимі роботи ЛЕС, окрім описаних вище критеріїв оптимізаційної задачі, необхідно враховувати значення обмінної потужності для забезпечення стабільної та надійної роботи ЛЕС.

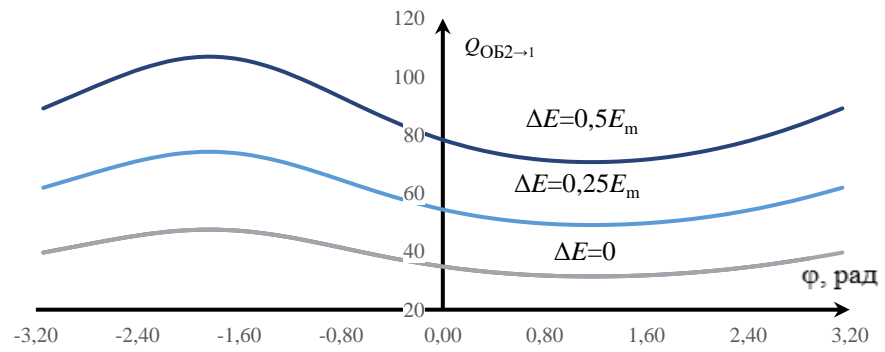


Рисунок 4.11 – Зміна величини обмінної потужності в ЛЕС при зміні параметрів ДРГ

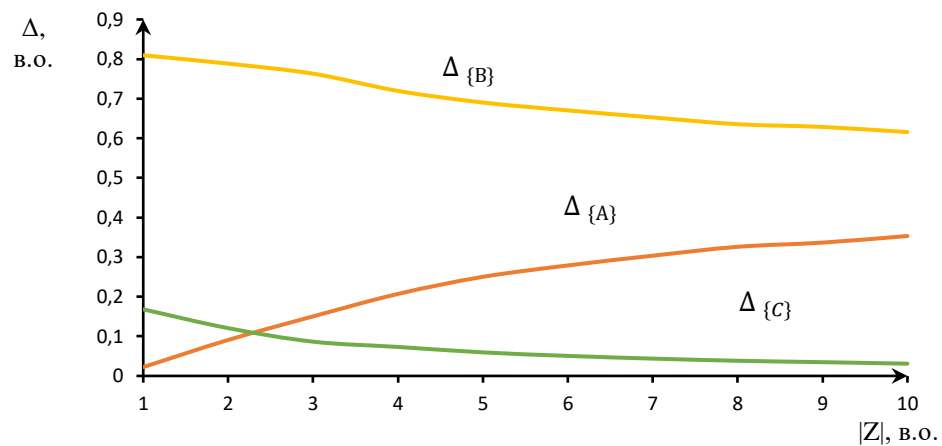


Рисунок 4.12 – Залежність величини обмінної потужності в ЛЕС від зміни модуля навантаження

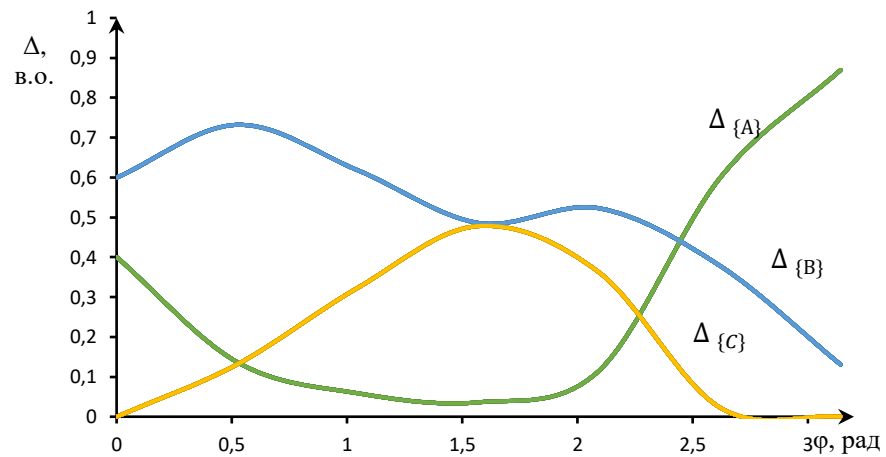


Рисунок 4.13 – Залежність величини обмінної потужності в ЛЕС від зміни кута навантаження

Висновки:

1. В даному розділі застосовано запропоновані методи децентралізованого керування ЛЕС. Згідно з результатами дослідження можна стверджувати, що батареї відіграють вирішальну роль у централізованій стратегії: їх можна використовувати при наявності даних про майбутні ціни може бути використано для оптимального керування запасами енергії, оптимізації закупівель та уникнення втрати потенціалу виробництва, коли це можливо. Оптимальну поведінку дуже важко формалізувати або імітувати.

2. Результати, отримані алгоритмом КН в сценарії S1, можна вважати більш прийнятним, особливо якщо порівнювати з алгоритмом ПВП. У двох інших сценаріях рішення, прийняті алгоритмом, заснованим на машинних рішеннях, призвели до погіршення результатів: він запропонував скоротити виробництво навіть тоді, коли це не було необхідним (третина загального потенційного виробництва не використовується в другому сценарії), і використовувати батареї неналежним чином. Безліч вхідних даних статистичних оцінок містить багато змінних, можливо, що несподівані значення деяких змінних усередині вхідних даних ввели в оману передбачення статистичних оцінок про оптимальні дії, які можна запропонувати. Алгоритм ПВП вдалося реалізувати краще, ніж КН у випадку сценарію S2.

3. Контрастні показники в трьох випадках, ймовірно, пов'язані з тим, що сценарій S1, з точки зору цін і профілів сонячного випромінювання, схожий на два сценарії навчання, в той час як сценарії S2 і S3 мають багато відмінностей у потенційному виробництві, профілях навантаження та ціни на електроенергію з даних, що використовуються у навчальному наборі. «Якість» навчального набору дійсно має критичний вплив на методи, засновані на імітаційному навчанні. Проведене моделювання демонструє, однак, що децентралізована схема керування, яка використовує тільки локальні вимірювання, розроблені, спираючись на методи керованого навчання, може давати, у стандартних випадках, кращі результати, ніж попередньо визначеній стратегії.

4. Дослідження ЛЕС з двома агентами генерації та агентом навантаження в острівному режимі показали, що використання обмінної потужності в ЛЕС для оптимізації режиму роботи системи є важливою складовою. При зміні параметрів генерації та споживання обмінна потужність також піддається вагомим змінам, що може спричинити погіршення стану ЛЕС при роботі в автономному режимі. Це дозволяє використати величину обмінної потужності, як один з критеріїв оптимізації роботи ЛЕС в автономному режимі роботи.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В магістерській дисертації Таргонського В.А. за темою «Мультиагентні системи керування споживачами електроенергії в локальних електроенергетичних системах» було досліджена та вирішена задача створення мультиагентних систем децентралізованого керування активними споживачами електроенергії в локальних електроенергетичних системах.

В рамках магістерської дисертації було досліджено особливості роботи локальних електроенергетичних систем та визначено. Розглянуто принципи побудови локальних систем електропостачання згідно з концепцією Smart Grid та досліджено питання створення та організації локальних ринків електричної енергії з формалізацією учасників ринку та правил його функціонування. Проаналізовано передовий досвід реалізації положень концепції Smart Grid та виділено перспективні напрямки його застосування в енергетичній галузі України. Для ефективного функціонування ЛЕС наведено проблеми, які необхідно вирішити, та методи їх вирішення, що оптимізують енергетичні процеси в локальних електромережах.

В другому розділі було розглянуто основні характеристики МАС систем керування, наведено переваги використання їх в енергетичній галузі. Запропоновано базовий перелік агентів МАС локальної електроенергетичної системи наведено їх функціональні обов'язки та математичні описи кожного агента, що дозволяє застосувати МАС в ЛЕС з врахуванням особливостей кожного об'єкту електроенергетичної системи. Запропонована формалізація рішення задач керування і оцінки ефективності функціонування ЛЕС на основі мультиагентної системи дозволила звести рішення технологічних завдань до дослідження узагальненої математичної моделі ЛЕС з вбудованою ІНС. Це дає можливість зв'язати важливі параметри реального стану ЛЕС з чисельними характеристиками критеріїв оптимальності її функціонування – технічними, економічними, екологічними. Описані характерні особливості активних споживачів електроенергії

В третьому розділі було формалізовано об'єднання активних споживачів всередині локальної електроенергетичної системи. Наведено математичні описи процесів генерації активної та реактивної енергії активними споживачами та динаміки роботи засобів акумуляції електроенергії. Для оптимальної роботи локальної електроенергетичної системи було запропоновано впровадження децентралізованої мультиагентної системи керування активними споживачами, що базується на використанні алгоритмів контрольованого навчання та оптимізації потоку потужності та дозволяє оцінити ефективність децентралізованих методів керування в ЛЕС. Для оптимізації потоків потужності всередині ЛЕС була сформована оптимізаційна задача мінімізації втрат активного споживача, що передбачає підтримку надійного стану ЛЕС. Оптимізаційна задача враховує прогнозовані значення генерації електроенергії PV-установками активного споживача, можливості до зберігання енергії засобами акумуляції електроенергії, рівень напруги на шинах активних споживачів та втрати потужності всередині ЛЕС.

В четвертому розділі було розділі застосовано запропоновані методи децентралізованого мультиагентного керування ЛЕС. Згідно з результатами дослідження можна стверджувати, що батареї відіграють вирішальну роль у централізованій стратегії: їх можна використовувати при наявності даних про майбутні ціни може бути використано для оптимального керування запасами енергії, оптимізації закупівель та уникнення втрати потенціалу виробництва, коли це можливо. Оптимальну поведінку дуже важко формалізувати або імітувати тому використані методи керування потребують покращення.

З точки зору керування ЛЕС в автономному режимі роботи було досліджено вплив обмінної потужності на стан системи. На прикладі спрощеної схеми ЛЕС було розраховано залежність обмінної потужності від зміни параметрів її елементів. Дослідження ЛЕС з двома агентами генерації та агентом навантаження в острівному режимі показали, що використання обмінної потужності в ЛЕС для оптимізації режиму роботи системи є важливою складовою. При зміні параметрів генерації та споживання обмінна

потужність також піддається вагомим змінам, що може спричинити погіршення стану ЛЕС при роботі в автономному режимі. Це дозволяє використати величину обмінної потужності, як один з критеріїв оптимізації роботи ЛЕС в автономному режимі роботи.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ye Cai, Tao Huang, Ettore Bompard, Yijia Cao, Yong Li. Self-Sustainable Community of Electricity Prosumers in the Emerging Distribution System. IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, Vol.: 8, Issue: 5, pp. 2207 – 2216, September 2017, DOI: 10.1109/TSG.2016.2518241.
2. Dimitrije Kotur, Nikola Rajakovic. Optimal reconfiguration of distribution network with participation of distributed electricity prosumers. Power Systems Department, University of Belgrade, School of Electrical Engineering, Belgrade, Serbia, 2016.
- 3 Zhenyu Zhou, Chuntian Zhang, Chen Xu, Fei Xiong, Yan Zhang, Tariq Umer. Energy-Efficient Industrial Internet of UAVs for Power Line Inspection in Smart Grid. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL INFORMATICS, № 6. June 2018.
4. Juan Miguel Gonzalez L'opez, Edris Pouresmaeil, Claudio A. Cañizares, Kankar Bhattacharya, Abolfazl Mosaddegh, Bharatkumar V. Solanki. Smart Residential Load Simulator for Energy Management in Smart Grids. IEEE Transactions on Industrial Electronics, № 2, February 2019.
5. Oktoviano Gandhi, Wenjie Zhang, Carlos D. Rodr'iguez-Gallegos, Monika Bieri, Thomas Reindl, Dipti Srinivasan. Analytical Approach to Reactive Power Dispatch and Energy Arbitrage in Distribution Systems with DER. IEEE Transactions on Power Systems, № 6. November 2018.
6. Laihyuk Park, Seohyeon Jeong, Joongheon Kim, Sungrae Cho. Joint Geometric Unsupervised Learning and Truthful Auction for Local Energy Market. IEEE Transactions on Industrial Electronics, VOL. 66, NO. 2, February 2019.
7. Luigi Martirano, Giuseppe Parise, Giacomo Greco, Matteo Manganelli, Ferdinando Massarella, Marta Cianfrini, Luigi Parise, Paolo di Laura Frattura, Emanuele Habib “Aggregation of users in a residential/commercial building managed by a building energy management system (BEMS). IEEE Transactions on Industry Applications, Rome, Italy, Feb. 2019.

8. Chandrasekhar Yammani, Pankaj Prab. Collaborative demand response in smart electric grid with virtual system operator. IET Smart Grid, pp.76 – 84, October 2018.
9. Yongli Wang, Yujing Huang, Yudong Wang, Haiyang Yu, Ruiting Du, Fuli Zhang, Fuwei Zhang. Optimal Scheduling of the Regional Integrated Energy System considering economy and environment. IEEE Transactions on Industry Applications, September 2018.
10. Tao Chen, Wencong Su. Local Energy Trading Behavior Modeling with Deep Reinforcement Learning. IEEE Access, pp. 62806 – 62814, October 2018.
11. Fotis D. Kanellos. Real-Time Control Based on Multi-Agent Systems for the Operation of Large Ports as Prosumer Microgrids. IEEE Access, pp. 9439 – 9452, 19 May 2017.
12. Changzheng Shao, Yi Ding, Pierluigi Siano, Zhenzhi Lin. A Framework for Incorporating Demand Response of Smart Buildings into the Integrated Heat and Electricity Energy System. IEEE Transactions on Industrial Electronics, № 2. February 2019.
13. Mengmeng Yu, Seung Ho Hong, Yuemin Ding, Xun Ye. An Incentive-Based Demand Response (DR) Model Considering Composited DR Resources. IEEE Transactions on Industrial Electronics, № 2. February 2019.
14. Gen M., Cheng R. Genetic Algorithms and Engineering Design. John Wiley & Sons, №1, 1997.
15. D. T. Nguyen, M. Negnevitsky, M. D. Groot. Pool-based demand response exchange—Concept and modeling. IEEE Trans. Power Syst., № 3, pp. 1677-1685, Aug. 2011.
16. Sara Yahia Altahir, Xiangwu Yan, Abuzaid Saeed Gadalla. Active and reactive power sharing control strategy for VSGs in microgrid considering the different capacities of distributed energy resources. IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications, vol.: 3, №: 3, pp. 167 - 173, 12th July 2018.
17. Gorkem Sen, Mustafa Baysal. Multi Agent-Based Decentralized Control for Improving the Efficiency and Voltage Regulation in Smart Microgrid. presented

at 2018 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST). Sevilla, Spain, 18 October 2018.

18. Tiago Pinto, Ricardo Faia, Maria Navarro-Caceres, Gabriel Santos, Juan Manuel Corchado, Zita Vale. Multi-Agent-Based CBR Recommender System for Intelligent Energy Management in Buildings. *IEEE Systems Journal*, Volume: 13, Issue: 1, pp. 1084 - 1095, November 2018, DOI: 10.1109/JSYST.2018.2876933.
19. Jingang Lai, Xiaoqing Lu, Xin Li, Ruo-Li Tang. Distributed Multiagent-Oriented Average Control for Voltage Restoration and Reactive PowerSharing of Autonomous Microgrids. *IEEE Access*, Vol.: 6, pp. 25551 – 25561, 25 April 2018.
20. Arvind Kumar, Lokesh Tiwari, Devendra Somwanshi. Design Architecture and Optimization of Multi Agent based Smart Grid. presented at 2018 IEEMA Engineer Infinite Conference (eTechNxT), New Delhi, India, 14 June 2018, DOI: 10.1109/ETECHNXT.2018.8385289.
21. Thomas Morstyn, Branislav Hredzak, Vassilios G. Agelidis. Network Topology Independent Multi-Agent Dynamic Optimal Power Flow for Microgrids with Distributed Energy Storage Systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 9, No. 4, July 2018.
22. Nian Liu, Xinghuo Yu, Cheng Wang, Chaojie Li, Li Ma, Jinyong Lei. Energy-Sharing Model with Price-Based Demand Response for Microgrids of Peer-to-Peer Prosumers. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 32, No. 5, September 2017.
23. Shichang Cui, Yan-Wu Wang, Nian Liu. Distributed game-based pricing strategy for energy sharing in microgrid with PV prosumers. *IET Renewable Power Generation*, 18th December 2017, doi: 10.1049/iet-rpg.2017.0570
24. Jung-Sung Park, Hak-Ju Lee, Dae-Young Kim. Challenges for utility with energy prosumer in Korea. *IET Renewable Power Generation*, 12-15 June 2017.
25. Maxwell L. Little, S. F. Rabbi, Kevin Pope, John E. Quaiacoe. Unified Probabilistic Modeling of Wind Reserves for Demand Response and Frequency

- Regulation in Islanded Microgrids. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 54, No. 6, December 2018.
26. Jeong-Won Kang, Le Xie, Dae-Hyun Choi. Impact of Data Quality in Home Energy Management System on Distribution System State Estimation. *IEEE Access*, 9th February 2018.
 27. Nur Mohammad, Yateendra Mishra. Coordination of wind generation and demand response to minimise operation cost in dayahead electricity markets using bi-level optimisation framework. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 5th July 2018.
 28. Peng-Yong Kong. A Distributed Management Scheme for Energy Storage in a Smart Grid with Communication Impairments. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 14, No. 4, April 2018.
 29. S. Rasoul Etesami, Walid Saad, Narayan B. Mandayam, H. Vincent Poor. Stochastic Games for the Smart Grid Energy Management with Prospect Prosumers. *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 63, No. 8, August 2018.
 30. Xiaohe Yan, Chenghong Gu, Heather Wyman-Pain, Furong Li. Capacity Share Optimization for Multiservice Energy Storage Management Under Portfolio Theory. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 66, No. 2, February 2019.
 31. Xuanyu Cao, Junshan Zhang, H. Vincent Poor. Joint Energy Procurement and Demand Response Towards Optimal Deployment of Renewables. *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN SIGNAL PROCESSING*, Vol. 12, No. 4, August 2018.
 32. Torsten Broeer, Francis K. Tuffner, Anaissia Franca, Nedjib Djilali. Demand Response System for Wind Power Integration: Greenhouse Gas Mitigation and Reduction of Generator Cycling. *CSEE JOURNAL OF POWER AND ENERGY SYSTEMS*, Vol. 4, No. 2, June 2018.
 33. Dan Wang, Liu Liu, Hongjie Jia, Weiliang Wang, Yunqiang Zhi, Zhengji Meng, Bingyu Zhou. Review of Key Problems Related to Integrated Energy

Distribution Systems. CSEE JOURNAL OF POWER AND ENERGY SYSTEMS, Vol. 4, No. 2, June 2018.

34. Wayes Tushar, Chau Yuen, Hamed Mohsenian-Rad, Tapan Saha, H. Vincent Poor, Kristin L. Wood. Transforming Energy Networks via Peer-to-Peer Energy Trading. IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 35, Issue: 4, pp. 90 – 111, July 2018, DOI: 10.1109/MSP.2018.2818327.
35. Majid Majidi, Kazem Zare. Integration of Smart Energy Hubs in Distribution Networks under Uncertainties and Demand Response Concept. IEEE Transactions on Power Systems.
36. Kai Ma, Pei Liu, Jie Yang, Xiaomin Wei, Chunxia Dou. Spectrum Allocation and Power Optimization for Demand-Side Cooperative and Cognitive Communications in Smart Grid. IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol.: 15, Issue: 3, pp. 1830 – 1839, March 2019, DOI: 10.1109/TII.2018.2868868
37. Ghezlane Halhoul Merabet, Mohamed Essaaidi, Mohamed El Brak, Driss Benhaddou. Agent Based for Comfort Control in Smart Building. IEEE Transactions on Power Systems.
38. Irena Dukovska, Nikolaos G. Paterakis, Han Slootweg. Local Energy Exchange Considering Heterogeneous Prosumer Preferences. published at 2018 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST), 18 October 2018, DOI: 10.1109/SEST.2018.8495865.
39. Li Ma, Nian Liu, Jianhua Zhang, Lingfeng Wang. Real-time Rolling Horizon Energy Management for the Energy-Hub-Coordinated Prosumer Community from a Cooperative Perspective. IEE Transactions on Power Systems, Vol.: 34, Is.: 2, pp. 1227–1242, March 2019, DOI: 10.1109/TPWRS.2018.2877236.
40. Shaun Howell, Yacine Rezgui , Jean-Laurent Hippolyte , Bejay Jayan, Haijiang Li. Towards the next generation of smart grids: Semantic and holonic multi-agent management of distributed energy resources. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 77, Pages 193-214, September 2017, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117304392>

41. Electricity «Prosumers», Brief of the European Parliament, November 2016
[http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2016/593518/EPRS_BRI\(2016\)593518_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2016/593518/EPRS_BRI(2016)593518_EN.pdf)
42. Operational, short-term and long-term optimization of the schedules of distributed energy in a locally regionalized power system. Automation and IT in power engineering, №11, 2016
<http://www.rtsoft.ru/press/articles/detail.php?ID=2929>
43. Grid Interactive Microgrid Controllers and the Management of Aggregated Distributed Energy Resources (DER). EPRI 2015.
44. Aleksandr Kirilenko, Serhii Denysiuk Modern Tendencies of Conclusion and Management modes of Electroenergy Networks. Energy saving. Power engineering. Energy audit, №9, vol.2, September 2018.
45. Serhii Denysiuk. Guidelines of technological concepts of smart grid in power system. POWER ENGINEERING: economics, technique, ecology, №1, 2014.
46. B. Stognii, O. Kyrylenko, O. Prahovnyk, S. Denysiuk. The Evolution of Intelligent Electrical Networks and Their Prospects in Ukraine. Technical Electrodynamics, №5, 2012.
47. Євгенія Цебрій. Енергія вітру: переваги та недоліки. Електронний ресурс Режим доступу: <https://te.20minut.ua/Podii/energiya-vitru-perevagi-ta-nedoliki-10562760.html>
48. Оксана Герасимюк. Вітрогенератори: переваги та недоліки використання. Електронний ресурс Режим доступу: <https://alternative-energy.com.ua/вітрогенератори-переваги-та-недоліки/>
49. Максим Овчаренко. Потужності відновлюваної електроенергетики у 2017. Електронний ресурс Режим доступу: <http://uprom.info/news/energy/potuzhnosti-vidnovlyuvanoyi-elektroenergetiki-u-2017-rotsi-zrosli-u-dva-razi/>
50. Максим Овчаренко. У другому кварталі поточного року понад 1000 домогосподарств встановили сонячні панелі. Електронний ресурс Режим

доступу: <http://uprom.info/news/energy/u-drugomu-kvartali-potochnogo-roku-ponad-1000-domogospodarstv-vstanovili-sonyachni-paneli/>

51. Держенергоефективності Електронний ресурс. Режим доступу: <http://saee.gov.ua/>
52. www.ren21.net Електронний ресурс Renewable Energy Policy Network for the 21th Century
53. www.irena.org Електронний ресурс International Renewable Energy Agency
54. Енергетична стратегія України на період до 2035 року "Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність"
55. Микола Петрович Кузнецов Особливості короткотермінового прогнозування потужності ВЕС та СЕС, 2017.
56. Таргонський В.А. Мультиагентні системи керування споживачами електроенергії в локальних інтелектуальних електромережах. Перша науково-технічна конференція магістрантів ІЕЕ – 21 листопада 2018 року.
57. Денисюк С.П., Таргонський В.А., Артем'єв М.В. Локальні електроенергетичні системи з активним споживачем: методи побудови та алгоритми їх функціонування. Науково-технічна конференція ЕНЕРГЕТИКА. ЕКОЛОГІЯ. ЛЮДИНА. – конференція молодих дослідників-студентів та аспірантів – 24-25 квітня 2019 року.
- 58 A. Kwasinski, W.Weaver, R. S. Balog, Microgrids and other Local Area Power and Energy Systems, 2016.
- 59 Yael Parag¹ and Benjamin K. Sovacool, Electricity market design for the prosumer era, 2016.
- 60 Rathnayaka, Potdar, Dillon, Hussain and Kuruppu, Goal-Oriented Prosumer Community Groups for the smart grids, IEEE Technology and Society Magazine, March, 2014.
- 61 RENEWABLE CAPACITY STATISTICS 2017, IRENA, 2017.Available. http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2017.pdf
- 62 Renewables 2017 - Global status report, REN21, 2017

- 63 Klaus Kursawe, George Danezis and Markulf Kohlweiss, Privacy-Friendly Aggregation for the Smart-Grid, S. Fischer-Hubner and N. Hopper (Eds.): PETS 2011.
- 64 A.J. Dinusha Rathnayaka, Vidyasagar M. Potdar, Tharam Dillon, Omar Hussain, Elizabeth Chang, A Methodology to find Influential Prosumers in Prosumer Community Groups, 2009.
- 65 Snapshot of Global Photovoltaic Markets, IEA, 2016.
- 66 Renewable Power Costs Plummet: Many Sources Now Cheaper than Fossil Fuels Worldwide, IRENA, 2015.
- 67 Renewables 2017 Global Status Report, REN21, 2017.
- 68 Photovoltaics report 2017, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE, July 2017.
- 69 Makkawi A, Celik AN, Muneer T., Evaluation of micro-wind turbine aerodynamics, wind speed sampling interval and its spatial variation, Services Engineering Research and Technology, 2009.
- 70 Claire Soares, Microturbines: Applications for Distributed Energy Systems, Butterworth-Heinemann, 2007.
- 71 David Gao, Energy Storage for Sustainable Microgrid, Academic Press, 2015
- 72 Steven E. Letendre, Willett Kempton, The V2G Concept: A new model for power. Public Utilities Fortnightly, February 15, 2002
- 73 Jasna Tomic, Willett Kempton, Using fleets of electric-drive vehicles for grid support, 2007.
- 74 J. A. Pecos Lopesa, Silvan A. Polenzb, C. L. Moreiraa, R. Cherkaouib, Identification of control and management strategies for LV unbalanced microgrids with plugged-in electric vehicles, Electric Power Systems Research, 2010.
- 75 F. Olivier, D. Ernst, R. Fonteneau, D. Marulli, Foreseeing New Control Challenges in Electricity Prosumer Communities, 2017.

- 76 A. J. Dinusha Rathnayaka, Vidyasagar M. Potdar, Samitha J. Kuruppu, Design of Smart Grid Prosumer Communities via Online Social Networking Communities, 2012.
- 77 Marnay, Rubio, Siddiqui, Shape of the microgrid, 2000.
- 78 TE Hoff, HJ Wenger, C. Herig, RW Shawn, A MICRO-GRID WITH PV, FUEL CELLS, AND ENERGY EFFICIENCY, 1998.
- 79 H.J. Song ; X. Liu ; D. Jakobsen ; R. Bhagwan ; X. Zhang ; K. Taura ; A. Chien, The MicroGrid: a Scientific Tool for Modeling Computational Grids 2000.
- 80 Mahmoud, AL-Sunni, Control and optimization of Distributed Generation System, Springer International Publishing Switzerland, 2015.
- 81 B. Stott, Review of load-flow calculation methods, Proceedings of the IEEE (Volume: 62, Issue: 7), July 1974.
- 82 B. Stott, O. Alsac, Fast Decoupled Load Flow, IEEE, May 1974.
- 83 Fortenbacher, Philipp and Zellner, Martin and Andersson, Goran, Optimal sizing A83 placement of distributed storage in low voltage networks, 2016.
- 84 Jen-Hao Teng, A Direct Approach for Distribution System Load Flow Solutions, IEEE, 2002.
- 85 C. Crisci, B. Ghattas, G. Perera, A review of supervised machine learning algorithms and their applications to ecological data, 2012.
- 86 Ian Richardson, Murray Thomson, David Infield, Conor Clifford, Domestic electricity use: A high-resolution energy demand model 2010.
- 87 Жуйков В.Я., Денисюк С.П. Енергетичні процеси в електричних колах з ключовими елементами. – К.: НТУУ «КПІ». – 2010. – 264 с.
- 88 Денисюк С.П. Технологічні орієнтири реалізації концепції Smart Grid в електроенергетичних системах. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2014. №1. – С. 7–20.
- 89 Koepke G. Electromagnetic Compatibility and Smart Grid Interoperability Issues. SGIP Document. – 2012. – №5. – P. 118.

- 90 Verma S.P., Kumar P., Noor-ul-Islam. Smart Grid, Its Power Quality and Electromagnetic Compatibility. MIT International Journal of Electrical and Instrumentation Engineering. – 2012. – №1. – P. 55–64.
- 91 Блінов І.В. Наукові основи організації взаємодії сегментів ринку електричної енергії: автореф. дис. докт. техн. наук: 05.14.01 / Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського". Київ. 2018.
- 92 Arzinger. Ринок енергетики: основні події 2018 року. Електронний ресурс. URL: <https://arzinger.ua/press/news/116751/>
- 93 SmartGrids SRA 2035 - Strategic Research Agenda, European Technology Platform SmartGrids, European Commission, Tech. Rep, Mar. 2012. Online. <http://www.smartgrids.eu/documents/sra2035.pdf>
- 94 Rohbogner Gregor, Hahnel Ulf J.J., Benoit Pascal, Fey Simon, Multi-agent systems' asset for smart grid applications. In: Computer Science and Information Systems 2013 Volume 10, Issue 4, p. 1799-1822.
- 95 A Kantamann, LE Brown, G Parker, WW Weaver, Survey of multi-agent systems for microgrid control. Engineering applications of artificial intelligence 45, 2015, p. 192-203.
- 96 M. Wooldridge, G. Weiss, Ed., "Intelligent Agents," in Multi-Agent Systems. Cambridge, MA: MIT Press, Apr. 1999
- 97 Stone, Peter, Veloso, Manuela, 2000. Multiagent systems: a survey from a machine learning perspective. *Autonom.Robots* 8 (3), p. 345-383.
- 98 McArthur, S.D.J., Davidson, E.M., Catterson, V.M., Dime, A.L., Hatziargyriou, N.D., Ponci, F., Funabashi T. Multi-agent systems for power engineering applications - part 1: Concepts, approaches and technical challenges. In: *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, No. 4, 11.2007, p. 1743-1752.
- 99 CIGRÉ. Working Group C6.22 Microgrids Evolution Roadmap, Microgrids 1: Engineering, Economics, & Experience, forthcoming.
- 100 Zhongwen Li, Chuanzhi Zang, Peng Zeng, Haibin Yu, and Hepeng Li, MAS based distributed automatic generation control for the cyber-physical microgrid

system. In: IEEE / CAA Journal of Automatica Sinica (Volume: 3, Issue: 1, January 10, 2016), pp. 78-89.

- 101 Shikhin V.A, Kosinsky M. Yu., Sedletsky G. S., Methodological approaches to the analysis of operational reliability of the grid complex with the use of intelligent models. - Prom Energy. 2015.-No. 5.-23-30.
- 102 Shikhin VA, Jamalova Z.I., Otunishiv AE, Abd Elrahim A.K. Real-time management of a micro-energy system with distributed hybrid generation based on a multiagent approach. Bulletin of the Kazakh Academy of Transport and Communications named after. M. Tynyshpayeva. - 2017.- No. 2 (101) .- P. 179-186

ДОДАТОК А

Інформація про характеристики Microgrid/ЛЕС

Оригінальні обговорення теми:

DH: <http://lists.oasis-open.org/archives/emix/201003/msg00036.html>

АН: <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2010/e10003.pdf>

DH: <http://lists.oasis-open.org/archives/emix/201003/msg00038.html>

GG: <http://lists.oasis-open.org/archives/emix/201003/msg00041.html>

PD: <http://lists.oasis-open.org/archives/emix/201003/msg00045.html>

WC: <http://lists.oasis-open.org/archives/emix/201003/msg00050.html>

АН: <http://lists.oasis-open.org/archives/emix/201004/msg00027.html>

Green = загально узгоджені характеристики

Black = кілька узгоджених характеристик

Red = дещо суперечливі характеристики

Джерела:

1. <http://galvinpower.org/microgrids>

- **локальні ДРГ**
- **можливість підвищення ефективності, кращої економіки, надійності, диверсифікації джерел**
- **надає можливості для отримання доходу від генерування (DR, RTP, допоміжні послуги)**
- **дозволяє інтегрувати відновлювані джерела енергії**
- **досягнення місцевих цілей конкретної групи користувачів**
- дозволяє участь споживачів електроенергії (місцевий вибір)
- дозволяє гнучке майбутнє зростання / розширення
- **дрібномасштабні версії існуючої централізованої мікромережі**

2. <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2010/e10003.pdf>

- **місцеві ДРГ, зберігання, система зарядки, навантаження**

- здатні працювати поза електромережею
- аналогічні інтерфейси для різних агентів підсистеми
- можна дистанційно керувати
- керування попитом відносно великих навантажень
- забезпечує систему зарядки для зберігання енергії
- **модульні (компоненти можуть бути додані / видалені без негативного впливу)**
- **децентралізована координація попиту та пропозицій, не потрібна центральна оптимізація (електронний ринок, на якому аукціоніст взаємодіє з агентами пристроїв та/або агрегаторами)**

3. <http://eetd.lbl.gov/CERTS/pdf/mg-pesc04.pdf>

- підсистеми генерації та супутнього навантаження
- може відокремитися від системи розподілу
- **острівність забезпечує більш високу локальну надійність**
- **локальний контроль розподіленої генерації**
- **усуває необхідність централізованого керування**

4. <http://www.oasis-open.org/committees/download.php/37036/energyinterop-1%200-spec-wd-09.pdf>

- **може включати місцеве генерування та зберігання**
- **інтерфейс зв'язку на межі кожної мікромережі однаковий**
- може містити менші мікромережі або бути частиною більшої мікромережі

5. <http://der.lbl.gov/>

<http://der.lbl.gov/research/microgrid-concept>

- **локалізоване групування джерел електроенергії (часто з когенерацією)**
- **працює підключено і синхронно з традиційною централізованою електромережею**

- призначені для роботи напів-автономно з локальним керуванням, незалежним від макромереж
- може відключатись і функціонувати автономно
- забезпечує гетерогенний рівень якості та надійності з урахуванням кінцевого використання на ковшній шкалі
- розраховані на загальні енергетичні потреби системи
- оптимізує загальну енергетичну систему кінцевого споживання і, як правило, транспортування тепла
- віддає: забезпечує зменшення затримок, швидке реагування на зміни, допоміжні послуги
- представляє собою мікромережу як єдину контрольовану сутність
- <1 МВт (приблизно)

6. <http://www.electricdistribution.ctc.com/microgrids.htm>

http://www.electricdistribution.ctc.com/pdfs/Microgrid_Assessment_Phase_1.pdf

- інтегрує місцеві ДРГ з електричними навантаженнями
- ДРГ обслуговують значну частину навантаження
- може працювати паралельно з мережею або островами
- може легко перемикатися між підключенням та відключенням до мережі
- забезпечує високу надійність і стійкість до порушень мережі
- забезпечує енергоефективність, зниження витрат, індивідуальні енергетичні рішення, незалежність / безпеку
- незалежно контрольовані
- зазвичай передбачає певний рівень використання когенерації
- має містити акумуляцію
- слідування за навантаженням (пікова генерація відповідає піковим навантаженням)
- керується ДРГ, а не вимогами до енергетичних послуг
- пріоритетні послуги (промислові, комерційні, житлові)

- добре підходить для областей з обмеженнями постачання / доставки та віддалених об'єктів
- захищає навантаження та економічно чутливий розвиток
- джерела генерації, не підключені до однієї електричної шини (для забезпечення деякого імпедансу)
- **доступне резервне відновлення електропостачання**
- **загальна генерація менше 1 МВт**
- **має містити більше одного джерела електроенергії**
- **приєднані до мережі тільки в одній точці ("точка загального підключення")**
- **відсутність двостороннього потоку потужності; з верхнього напрямку виглядає як будь-який інший споживач**
- **повинні відповідати повним вимогам щодо навантаження**

7. <http://certs.lbl.gov/certs-der-micro.html>

- **відокремлюється та ізолює від сітки без будь-якого впливу на якість електроенергії**
- **QoS визначається потребами клієнта**
- незалежний, гнучкий, керований інтерфейс між мікромережами і макромережами
- **немає головного компонента**
- **не відрізняється від місць без ДРГ**
- **peer to peer дозволяє одному з джерел енергії провалюватися, але мікрогрід продовжує працювати**
- **автоматично перепідключається/синхронізується з мережею, якщо причина відключення зникає**

8. <http://www.naesb.org/pdf4/interimsmartgridroadmapnistrestructure.pdf>

- **електричний «острів»: диспетчерське зберігання, ДРГ і керування навантаженням для підтримки мікрогрід**

ДОДАТОК Б

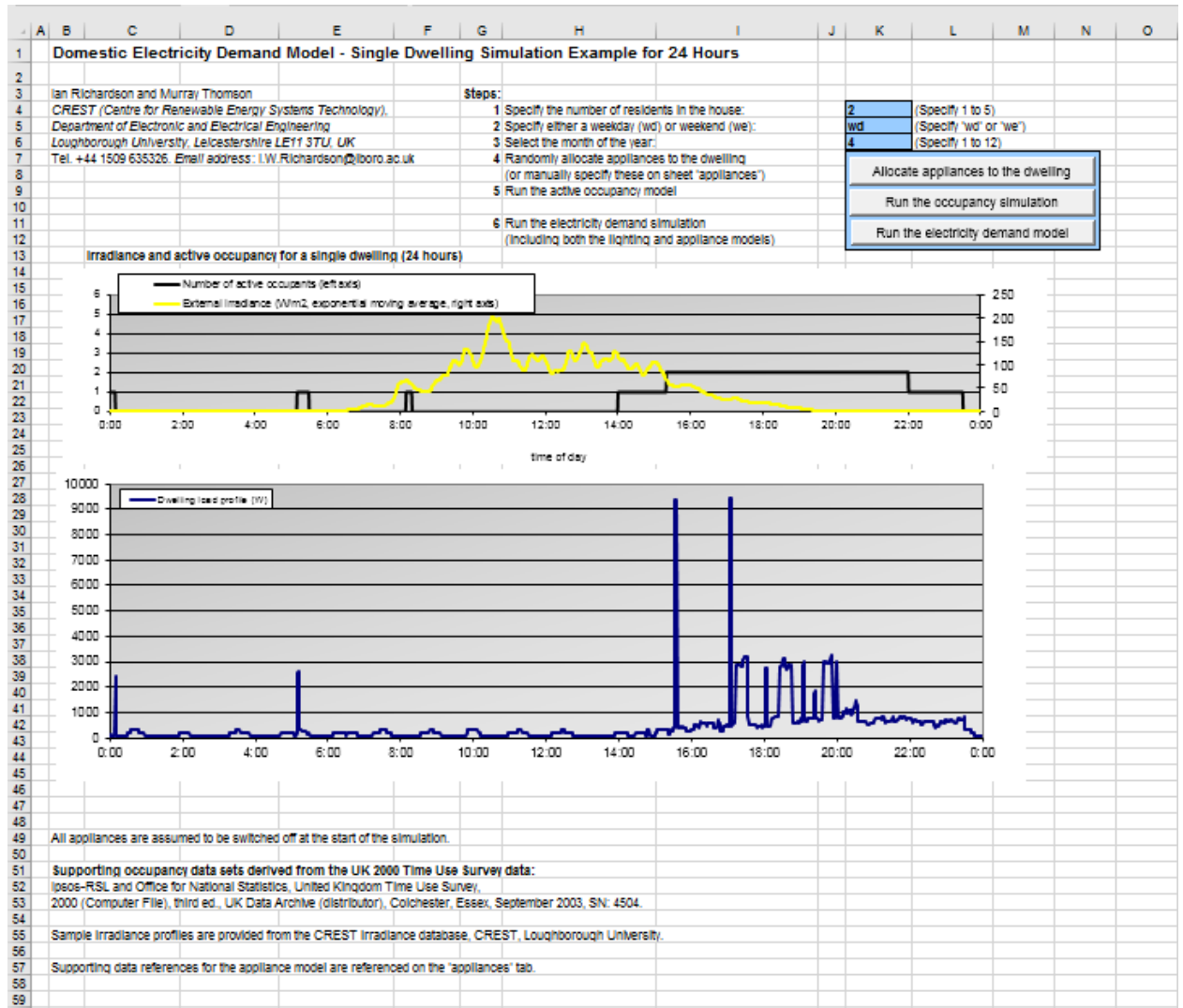
Таблиця – Функціональні характеристики агентів МАСК електромережі

Агент	Функціональні характеристики
Підтримка технологічного керування на рівні генерації	<ul style="list-style-type: none"> • розрахунок необхідних агрегованих і / або похідних значень (середнє, інтегральне, похідною і т.п.) • ведення архівів • контроль технологічних і режимних меж • формування, передача і реєстрація (запис) сигналів про факти порушення і його характеристиках (час, тривалість, величина і т.д.) • контроль стану комутаційного обладнання • контроль порушення заданої схеми роботи підстанції (топології), формування, передача і реєстрація (запис) сигналів про переходах і їх характеристиках (час, величина розривається струму, значення напруги і т.д.). • дистанційне керування комутаційними апаратами, контроль виконання команд, реєстрацію (запис) команд і результатів. • автоматичне відновлення енергопостачання (збірка шин), автоматичне здійснення заданих послідовностей перемикачів • інтелектуальна підтримка прийняття диспетчерських рішень (у формі, як експертно-аналітичних повідомлень з будь-якого необхідного профілю запитів, так і рекомендацій з управління, одержуваних на основі адаптивних алгоритмів); • оптимізація складу і кількості працюючого обладнання; • розробка балансів електроенергії та потужності, короткострокове планування;
Агент власник	<ul style="list-style-type: none"> • Оптимізація витрат на ремонт експлуатаційного обладнання • Аналіз ринку на основі інформації від інших агентів • Прогноз споживання ЕЕ • Прогноз попиту на ЕЕ • Розрахунок оптимальних тарифів на наступний період • Прогноз тарифів

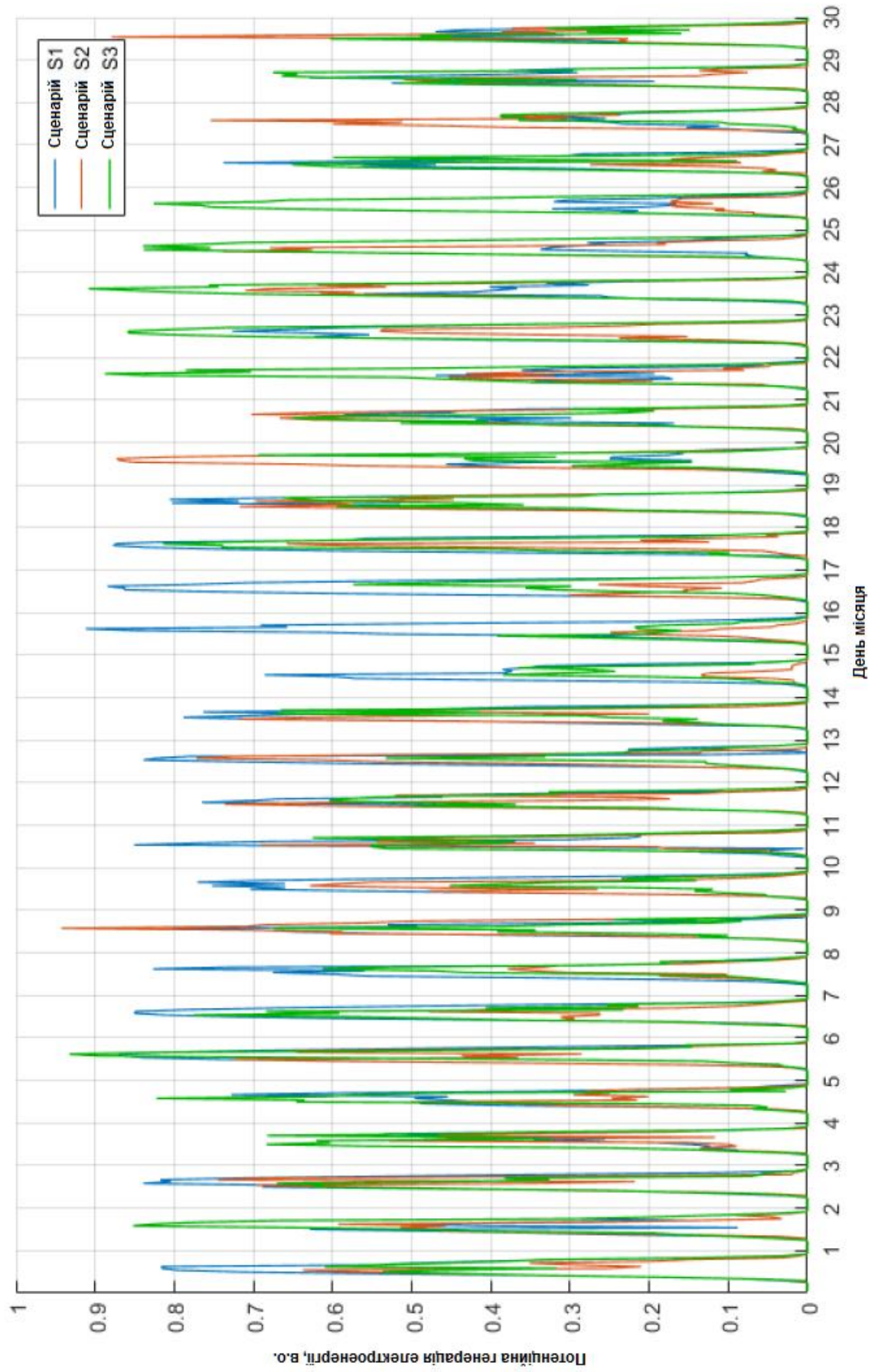
	<ul style="list-style-type: none"> • Підрахунок втрат з власної вини • Розрахунок штрафів • Оптимізація витрат на системні послуги
Підтримки технологічного керування на рівні сегмента	<ul style="list-style-type: none"> • інтелектуальний аналіз даних моніторингу (Data Mining) в режимі реального функціонування; • автоматичне керування потоками потужності на основі адаптивних алгоритмів прогнозування з використанням динамічних моделей [3]; • прогнозування стану мережі, пропускної спроможності мереж, споживання; • прогноз обсягів поставки і резервів системних генераторів, гідроресурсів, обсягів поставок генераторів, що працюють із вимушеного графіком, потужності, що виробляється всіма об'єктами генерації; • координація ремонтних кампаній мережевого і генеруючого обладнання; • планування резервів активної потужності генераторів для ринку реального часу.
Комерційний агент на рівні сегмента	<ul style="list-style-type: none"> • Аналіз ринку на основі інформації від всіх агентів • Прогноз попиту на ЕЕ • Підрахунок втрат (в тому числі, в високовольтних складно-замкнутих мережах) • Розрахунок штрафів • Врегулювання розбіжностей між учасниками енергообміну • Прогноз потреб на системні послуги
Технологічне керування на рівні координатора	<ul style="list-style-type: none"> • інтелектуальна підтримка прийняття диспетчерських рішень (у формі як експертно-аналітичних повідомлень з будь-якого необхідного профілю запитів, так і рекомендацій по управлінню, одержуваних на основі адаптивних алгоритмів); • оптимізація складу і кількості працюючого обладнання; • розробка балансів електроенергії та потужності, • короткострокове планування; • регулювання напруги, не допускаючи його зниження і коливання, тим самим, домагаючись високого ККД багатьох видів електричних машин і пристроїв;

	<ul style="list-style-type: none"> • контроль гармонійного складу і небалансу струмів і напруг, заходи по ліквідації джерел порушень якості, тим самим збільшення ресурсу роботи обладнання, надійність енергопостачання; • моніторинг поточного технічного стану з метою запобігання аварійних відключень (передаварійному висновок з роботи); недопущення наднормативної завантаження на граничних режимах.
Комерційний агент на рівні координатора	<ul style="list-style-type: none"> • забезпечення функціонування системи розрахунків вибору складу включеного генеруючого обладнання на тиждень вперед; • формування актуалізованої розрахункової моделі для проведення Комерційним оператором конкурентного відбору в ринку на добу вперед; • забезпечення функціонування балансуючого ринку - розрахунок і доведення графіків генерації при фактичному управлінні ЄЕС в режимі реального часу; • прогноз потреб на системні послуги.

ДОДАТОК В



ДОДАТОК Г



ДОДАТОК Д

